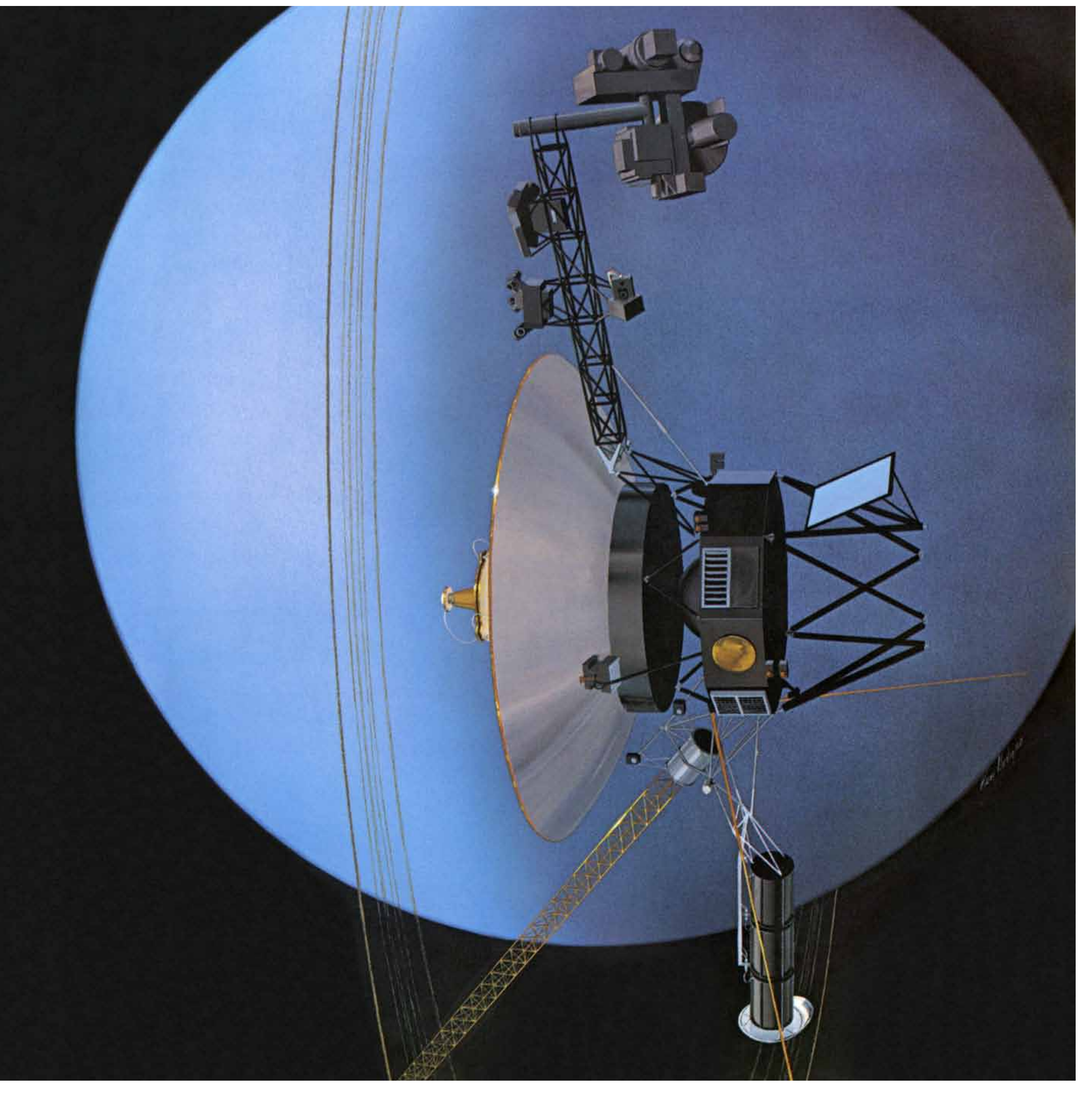
# INVESTIGACION Y CIENCIA

*Edición en español de* SCIENTIFIC AMERICAN



*VOYAGER 2*: TRIUNFO EN EL ESPACIO

*Enero 1987*

450 PTAS.
(IVA INCLUIDO)

*Número 124*
*Enero 1987*

# INVESTIGACION Y CIENCIA
Edición en español de SCIENTIFIC AMERICAN

**6** **PREVENCION DEL RECHAZO DE TRASPLANTES, Serafín Fraga, Luis Seijo, Mercedes Campillo y Bhagirath Singh** La solución podría encontrarse en las vacunas sintéticas.

**18** **PREPARANDO EL ENCUENTRO DEL *VOYAGER 2* CON URANO, Richard P. Laeser, William I. McLaughlin y Donna M. Wolff** Los movimientos de la nave se gobernaron desde la Tierra.

**30** **GEOLOGIA POR INTERFEROMETRIA DE MUY LARGA BASE, William E. Carter y Douglas S. Robertson** Se aprovechan las señales de cuásares para el estudio de nuestro planeta.

**42** **FUNCION ENZIMATICA DEL ARN, Thomas R. Cech**
Sin ser una proteína, el ácido ribonucleico es capaz de desempeñar funciones catalíticas.

**52** **EL BOSON DE HIGGS, Martinus J. G. Veltman**
Podría aportar rigor matemático al modelo convencional de partículas y fuerzas elementales.

**60** **PECES ANTARTICOS, Joseph T. Eastman y Arthur L. DeVries**
Medran en aguas heladas fabricando potentes anticongelantes biológicos y ahorrando energía.

**68** **CARACTERISTICAS Y OBJETOS DEL PROCESAMIENTO VISUAL, Anne Treisman**
De la escena se extraen automáticamente sus características, que se agrupan luego en objetos.

**80** **GALILEO Y EL FANTASMA DE BRUNO, Lawrence S. Lerner y Edward A. Gosselin**
Se procesó a Galileo porque sus objetivos se confundieron, en parte, con los de Bruno.

**3** AUTORES

**4** HACE...

**40** CIENCIA Y SOCIEDAD

**89** JUEGOS DE ORDENADOR

**94** TALLER Y LABORATORIO

**99** LIBROS

**104** BIBLIOGRAFIA


EDITA Prensa Científica, S.A.
Calabria, 235-239
08029 Barcelona (ESPAÑA)

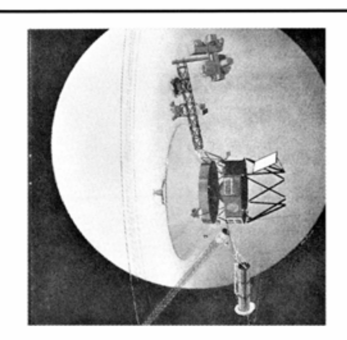
**Colaboradores de este número:**

*Asesoramiento y traducción:*

Manuel Puigcerver: *Preparando el encuentro del* Voyager 2 *con Urano;* Jesús Gómez González: *Geología por interferometría de muy larga base;* Julio Montoya: *Función enzimática del ARN;* Ramón Pascual: *El bosón de Higgs;* Manuel Crespo: *Peces antárticos;* Manuel Bandrés Merino: *Características y objetos del procesamiento visual;* Miguel Angel Granada Martínez: *Galileo y el fantasma de Bruno;* Luis Bou: *Juegos de ordenador;* J. Vilardell: *Taller y laboratorio.*

*Libros:*

Miguel de Guzmán, José Chabás, Juan A. Paniagua y Luis Alonso



## LA PORTADA

La imagen de la portada representa la escena que fotografiaría un observador cerca del *Voyager 2* cuando éste estaba alcanzando su punto de máxima proximidad a Urano, después de cruzar el plano definido por los anillos del planeta. El suceso ocurrió el día 24 de enero de 1986, y dio por resultado un gran volumen de datos acerca del planeta, sus anillos y sus satélites. Para lograr que el *Voyager 2* llegase hasta allí y que sus instrumentos científicos funcionasen satisfactoriamente, se requirió una considerable dosis de habilidad e ingenio (véase "Preparando el encuentro del *Voyager 2* con Urano", por Richard P. Laeser, William I. McLaughlin y Donna M. Wolff, en este número). El vehículo espacial, que se lanzó hace más de nueve años, aparece representado por su antena paraboloidal blanca de 3,7 metros de diámetro. Proyectándose hacia arriba desde la base de la antena hay un andamio en el que se sujetan varios instrumentos: cámaras, espectrómetros y detectores de partículas; más abajo hay tres generadores eléctricos y un botalón largo de color dorado que soporta un par de magnetómetros.

*Suscripciones:*
Prensa Científica, S. A.
Calabria, 235-239
08029 Barcelona (España)
Teléfono 322 05 51 ext. 33-37

*Condiciones de suscripción:*
España:
Un año (12 números):
4950 pesetas (IVA incluido)
Extranjero:
Un año (12 números): 35 U.S. $
Ejemplar atrasado ordinario:
450 pesetas (IVA incluido)
Ejemplar atrasado extraordinario:
575 pesetas (IVA incluido)

*Distribución para España:*
Distribuciones de Enlace, S. A.
Bruch, 49 - 08009 Barcelona

*Distribución para los restantes países:*
Editorial Labor, S. A.
Calabria, 235-239 - 08029 Barcelona

*Publicidad:*
Madrid:
Gustavo Martínez Ovin
O'Donnell, 18, 4.º J - 28009 Madrid
Teléfonos 275 88 85 - 275 90 85
Cataluña:
Paulino Muñoz Victoria
Muntaner, 467-469, 3.º, 3.ª
08021 Barcelona
Teléfono 211 92 45

Controlado por O.J.D.

## PROCEDENCIA DE LAS ILUSTRACIONES

Fotografía de la portada de Ken Hodges

| Página | Fuente |
|---|---|
| 6 | S. Fraga, L. Seijo, M. Campillo y B. Singh |
| 8-14 | S. Fraga, L. Seijo, M. Campillo, B. Singh y Magda Mària |
| 15 | S. Fraga, L. Seijo, M. Campillo y B. Singh |
| 19 | Jon Brenneis |
| 20-21 | Hank Iken |
| 22 | Hank Iken (*arriba*) y Jet Propulsion Laboratory/ National Aeronautics and Space Administration (*abajo*) |
| 23-25 | Hank Iken |
| 26-27 | Jet Propulsion Laboratory/ National Aeronautics and Space Administration |
| 31 | Douglas S. Robertson y National Geodetic Survey |
| 32-38 | George Kelvin y Science Graphics |
| 40 | *Spektrum der Wissenschaft* |
| 43-50 | Thomas C. Moore |
| 53 | Hank Iken |
| 54 | Edward Bell |
| 55-58 | Andrew Christie |
| 61 | Joseph T. Eastman, Universidad de Ohio, y Arthur L. DeVries, Universidad de Illinois |
| 62 | Tom Prentiss |
| 63 | Edward Bell |
| 64-66 | Tom Prentiss |
| 67 | Joseph T. Eastman, Universidad de Ohio, Arthur L. DeVries, Universidad de Illinois en Urbana-Champaign (*izquierda*) y Tom Prentiss (*derecha*) |
| 69 | Jon Brenneis |
| 70-78 | Jerome Kuhl |
| 81 | Scala/Art Resource |
| 82 | Biblioteca de la Universidad de Yale |
| 83 | Bibliothèque Nationale |
| 84 | Scala/Art Resource |
| 85 | Quesada/Burke, cortesía de Rare Book Division, Astor, Lenox and Tilden Foundations, Biblioteca Pública de Nueva York |
| 86 | Rare Book Division, Astor, Lenox and Tilden Foundations, Biblioteca Pública de Nueva York |
| 90-91 | David Wiseman, Universidad de Ontario occidental |
| 92-93 | Johnny Johnson |
| 94-98 | Michael Goodman |

ISSN 0210-136X
Dep. legal: B. 38.999-76
Fotocomposición Tecfa, S.A.
Almogàvers, 189 - 08018 Barcelona
Fotocromos reproducidos por GINSA, S.A.
Gráfica Elzeviriana, S.A.
Nápoles, 249 - Tel. 207 40 11
08013 Barcelona
Printed in Spain - Impreso en España

# Los autores

SERAFIN FRAGA, LUIS SEIJO, MERCEDES CAMPILLO y BHAGIRATH SINGH ("Prevención del rechazo de trasplantes") presentan un ejemplo de colaboración entre investigadores teóricos y experimentales. Los cálculos han sido realizados en el laboratorio de Fraga (doctor por la Universidad Complutense, doctor "honoris causa" por la Universidad Autónoma de Barcelona y catedrático de química teórica en la Universidad de Alberta), mientras que el trabajo inmunológico ha sido dirigido por el doctor Singh, catedrático de inmunología en la Universidad de Alberta e investigador de la Alberta Heritage Foundation for Medical Research. Los doctores Seijo (del departamento de química física de la Universidad de Oviedo) y Campillo (del departamento de bioestadística de la Universidad Autónoma de Barcelona), ambos teóricos, se desplazaron a la Universidad de Alberta para participar en este ambicioso proyecto de investigación.

RICHARD P. LAESER, WILLIAM I. McLAUGHLIN y DONNA M. WOLFF ("Preparando el encuentro del *Voyager 2* con Urano") han participado activamente en el proyecto Voyager desde sus respectivos trabajos en el Laboratorio de Propulsión a Chorro (JPL). Laeser es director del proyecto, cargo que viene ocupando desde 1981. Con anterioridad había coordinado la misión de los dos lanzamientos del Voyager y de los encuentros de ambas naves con Júpiter y Saturno. Se formó en el Instituto de Tecnología de Massachussets y en la Universidad de California del Sur. McLaughlin fue director de ingeniería de vuelo durante la misión a Urano del *Voyager 2*. Tras doctorarse en matemáticas por la Universidad de California en Berkeley, en 1968, ingresó en Bellcomm Inc., para participar en el proyecto de alunizaje del Apolo. En 1971 ingresó en la plantilla del JPL. Wolff, adscrito al JPL desde 1974, fue director adjunto de ingeniería de vuelo durante la misión Urano. Además de participar en el proyecto *Voyager*, ha colaborado en el diseño de varias misiones espaciales, así la sonda *Galileo*, para el estudio de Júpiter, y la *Ulysses*, para el estudio del Sol (proyectos, ambos, que han quedado indefinidamente aplazados).

WILLIAM E. CARTER y DOUGLAS S. ROBERTSON ("Geología por interferometría de muy larga base") trabajan en el Servicio Nacional de Geodesia, de los Estados Unidos. Carter inició su ya larga carrera de geodesta en las Fuerzas Aéreas. Tras ocho años como oficial geodesta pasó a prestar sus servicios en el Laboratorio de Investigación del Ejército del Aire en Cambridge, en 1969. Durante su permanencia en ese centro trabajó en el diseño, desarrollo y puesta en marcha de un primer observatorio lunar por técnicas de rayos láser situado en Tucson, Arizona. En 1973, año en que se recibió de doctor por la Universidad de Arizona, fue nombrado director del Observatorio Haleakala de la Universidad de Hawai en Manoa. Como tal, supervisó el diseño, construcción, ensayos y funcionamiento del observatorio. Robertson se licenció en ciencias físicas por el Principia College, doctorándose en geología por el Instituto de Tecnología de Massachussets. Pasó entonces a la plantilla de la Computer Sciences Corporation, donde desarrolló programas para el análisis de datos interferométricos de muy larga base.

THOMAS R. CECH ("Función enzimática del ARN") es profesor de química y bioquímica de la Universidad de Colorado en Boulder. Inició su formación en el Grinnel College, licenciándose y doctorándose por la Universidad de California en Berkely. Tras colaborar con el departamento de biología del Instituto de Tecnología de Massachussets se integró en el claustro docente de la Universidad de Colorado en 1978.

MARTINUS J. G. VELTMAN ("El bosón de Higgs") enseña física en la Universidad de Michigan. En 1963 se doctoró por la Universidad de Utrecht. Ese mismo año se trasladó a los Estados Unidos y comenzó a trabajar en el Centro del Acelerador Lineal de Stanford. En 1966 accedió a una cátedra de la Universidad de Utrecht, centrando, a partir de entonces, su atención en el problema de la renormalización de los campos de Yang-Mills. En 1981 le contrató la Universidad de Michigan.

JOSEPH T. EASTMAN y ARTHUR L. DeVRIES ("Peces antárticos") son, respectivamente, profesor asociado de anatomía y zoología de la Universidad de Ohio y profesor de fisiología de la Universidad de Illinois en Urbana. Eastman cursó estudios universitarios en Minnesota, doctorándose en 1970. Perteneció al clasutro docente de la Facultad de Medicina de la Universidad Brown desde 1973 hasta 1979, cuando pasó a ocupar su cargo actual. Eastman ha realizado trabajos de investigación de campo en la Antártida en tres ocasiones: una para estudiar la anatomía de las focas antárticas y las restantes para estudiar la de los peces. DeVries se licenció por la Universidad de Montana y se doctoró por la de Stanford. Siendo aún estudiante empezó a investigar los compuestos anticongelantes biológicos de los peces de aguas frías. De 1971 a 1976 estuvo en la Institución Oceanográfica Scripps. Pasó luego a la Universidad de Illinois en Urbana-Champaign que, en 1984, le contrató como catedrático.

ANNE TREISMAN ("Características y objetos del procesamiento visual") enseña psicología en la Universidad de California en Berkeley. De origen británico, se formó en las universidades de Cambridge y Oxford. Tras licenciarse, investigó en diversos centros de Gran Bretaña y los Estados Unidos, integrándose, en 1978, en el departamento de psicología de la Universidad canadiense de Columbia Británica. Los trabajos de investigación que describe en su artículo los financiaron el Instituto de Investigaciones Avanzadas y el Consejo de Investigación en Ciencias Naturales e Ingeniería, ambos canadienses. Treisman se trasladó a Berkeley en 1986.

LAWRENCE S. LERNER y EDWARD A. GOSSELIN ("Galileo y el fantasma de Bruno") iniciaron una larga colaboración profesional y lo que es ya una antigua amistad cuando impartían un curso interdisciplinario en la Universidad estatal de California en Long Beach, donde Lerner es profesor de física y astronomía y Gosselin enseña historia. Lerner, doctor en física del estado sólido por la Universidad de Chicago, trabajó durante varios años en laboratorios de investigación de industrias electrónicas y aeroespaciales antes de incorporarse, en 1969, al claustro de Long Beach. Da cursos de historia y sociología de la ciencia. Gosselin se licenció por la Universidad de Yale y se doctoró por la de Columbia. Sus investigaciones se centran en la historia intelectual y cultural del Renacimiento y la Reforma y en la historia de la ciencia.

# Hace...

José M.ª López Piñero

*... cuatrocientos años*

Murió en Madrid Francisco Hernández.

Nacido en la localidad toledana de Puebla de Montalbán, Hernández estudió medicina en la Universidad de Alcalá. Tras ejercer durante algunos años la profesión en Toledo y Sevilla, ocupó uno de los puestos mejor pagados y de más categoría en la España de la época: el de médico de los hospitales del Monasterio de Guadalupe, donde funcionaba un prestigioso centro de perfeccionamiento para cirujanos y médicos graduados. A mediados de los años sesenta volvió a Toledo, estando ya en contacto directo con la Corte, a la que se trasladó como médico de cámara del rey a finales de 1568 o principios de 1569.

Convencido seguidor del humanismo de corte erasmista, Hernández tenía una sólida formación intelectual y científica y una mentalidad abierta a las novedades. Practicó en Guadalupe disecciones de cadáveres humanos, de acuerdo con los supuestos del movimiento encabezado por Vesalio, que fue amigo personal suyo, lo mismo que Juanelo Turriano, Juan de Herrera o Benito Arias Montano. También fue uno de los más tempranos defensores de la circulación pulmonar. Por encima de todo destaca, sin embargo, su dedicación de naturalista. En sus años sevillanos exploró diversas zonas de Andalucía, en ocasiones junto al cirujano Juan Fragoso, para estudiar su flora y su fauna. Más tarde dirigió las plantaciones del jardín botánico de Guadalupe y recorrió las sierras extremeñas en busca de plantas y animales, alguno de los cuales disecó.

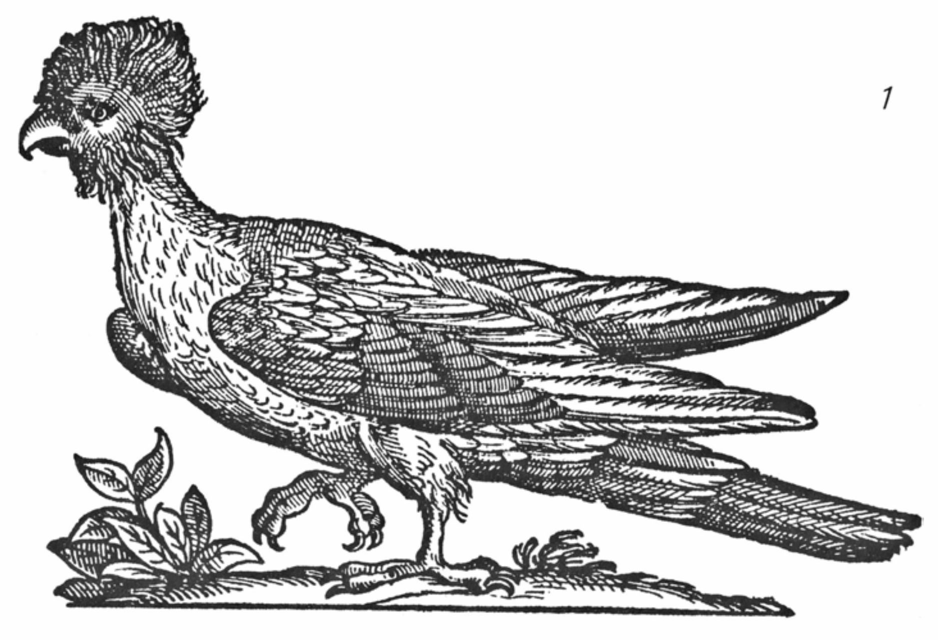
No resulta nada extraño que Felipe II eligiera precisamente a Hernández como director de una expedición destinada a estudiar la historia natural americana. Incluso es probable que su traslado a la Corte estuviera motivado por el proyecto. En cualquier caso, en enero de 1570 el rey lo nombró "protomédico general de nuestras Indias, islas y tierra firme del mar Océano", con órdenes "tocantes a la historia de las cosas naturales que habéis de hacer en aquellas partes".

Mandaba la primera de dichas órdenes "que en la primera flota que destos reinos partiera para la Nueva España os embarquéis y vais a aquella tierra primero que a otra ninguna de las dichas Indias, porque se tiene relación que en ella hay más cantidad de plantas e yerbas y otras semillas medicinales que en otra parte". La expedición, planificada para cinco años, no estaba en principio limitada a México. Por ello, en la misma fecha citada, Felipe II dirigió a los virreyes de Nueva España y del Perú dos *instrucciones* con idéntico texto.

Terminados los preparativos, Francisco Hernández salió de Sevilla en agosto del mismo año, acompañado, entre otros, de su hijo mayor Juan, que serviría de secretario de la expedición, y del cosmógrafo Francisco Domínguez, encargado de tomar las "alturas" de los territorios que se fueran estudiando y de trazar sus mapas. En febrero de 1571 desembarcó en Veracruz. Durante los seis meses transcurridos estuvo sucesivamente en Gran Canaria y Santo Domingo y Cuba, islas sobre cuya historia natural escribió tres estudios que no han llegado hasta nosotros. Hasta marzo de 1574 recorrió —afirma Somolinos— "la casi totalidad de los territorios entonces descubiertos de la Nueva España... desarrollando en sus viajes una especie de grandes circuitos que abarcaban regiones enteras": la zona central mexicana, las costas del Mar Austral y Oaxaca, Michoacán y el Pánuco.

Los componentes de la expedición eran, aparte del propio Hernández, su hijo y el cosmógrafo, dos o tres pintores, otros tantos escribientes, varios herbolarios, un intérprete, algunos médicos indígenas y los mozos y acemileros. Desde marzo de 1574 hasta su regreso a España en febrero de 1577, Hernández residió en la ciudad de México, dedicado a ordenar los materiales, a experimentar los efectos terapéuticos de las drogas locales y a escribir. Estudió también la arqueología mexicana y, por supuesto, practicó la medicina en el Hospital Real de Indios, enfrentándose con la epidemia de "cocolitze" de 1576, en la que asistió a las autopsias que practicó Alonso López de Hinojosos.

Los materiales que se entregaron al rey como resultado de la expedición incluían plantas vivas plantadas en barriles y cubetas, "sesenta y ocho talegas de simientes y raíces", plantas secas "pegadas en hojas", pinturas de vegetales y animales en tablas de pino y treinta y ocho volúmenes con dibujos y textos. Entre estos últimos había tres tomos en náhuatl, idioma que Hernández aprendió y al que tradujo buena parte de su estudio para que sus resultados fueran, según sus palabras, "de utilidad" a la población indígena me-




*Tres ejemplos de los grabados de la edición de la Accademia dei Lincei del* Rerum medicarum Novae Hispaniae thesaurus, *de Francisco Hernández (1628): (1)* Tzopílotl *(zopilote,* Catartes aura *Illig) (2) Tómatl (tomatera,* Solanum lycopersicum *L.) (3 y 4)* Tlaolli *(maíz,* Zea mays *L.).*

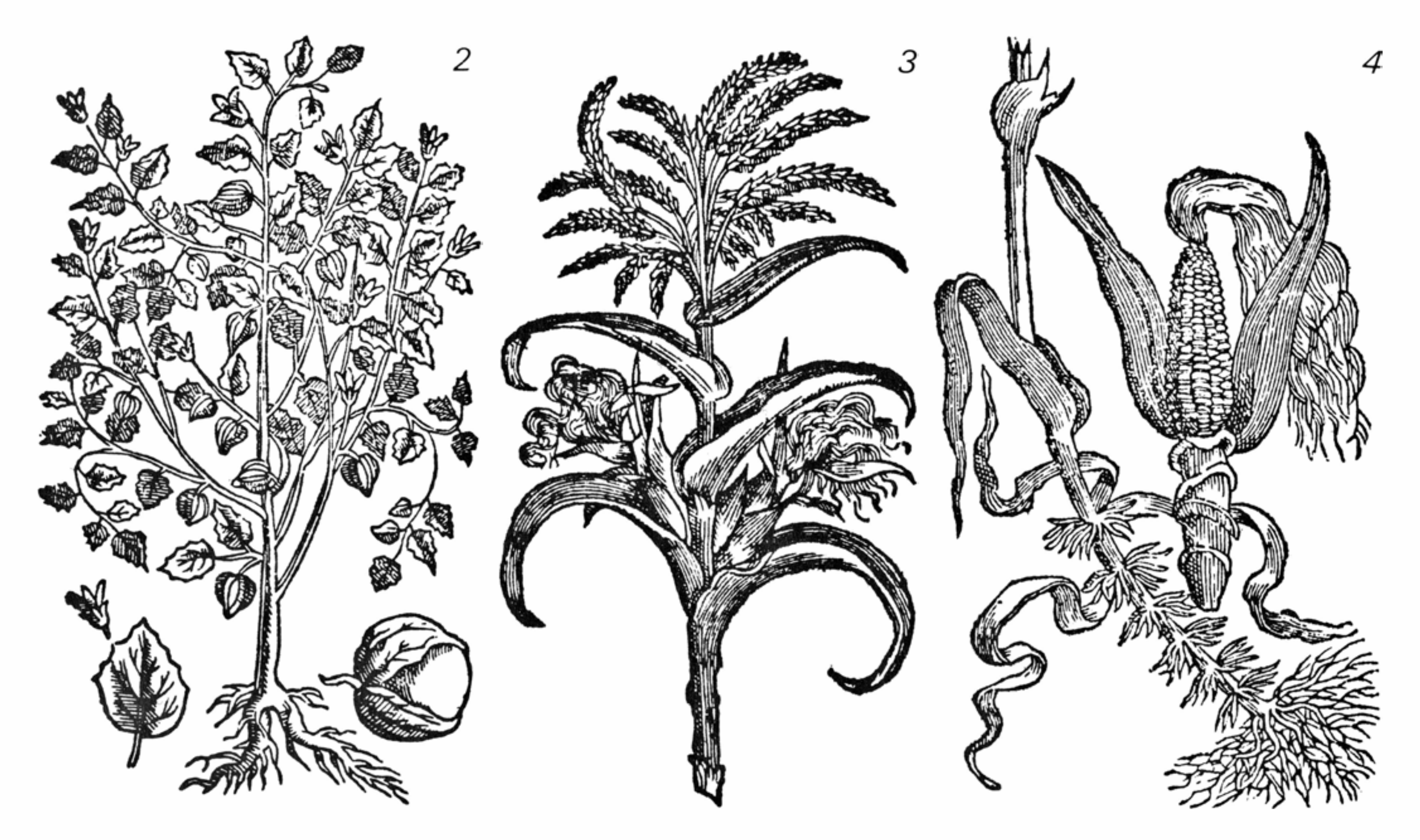
xicana. Otra muestra de la relación que llegó a tener con ésta —tan distinta de la de otras figuras científicas de la época— es la serie de mandas que incluyó en su testamento en favor de varios colaboradores nativos de su expedición.

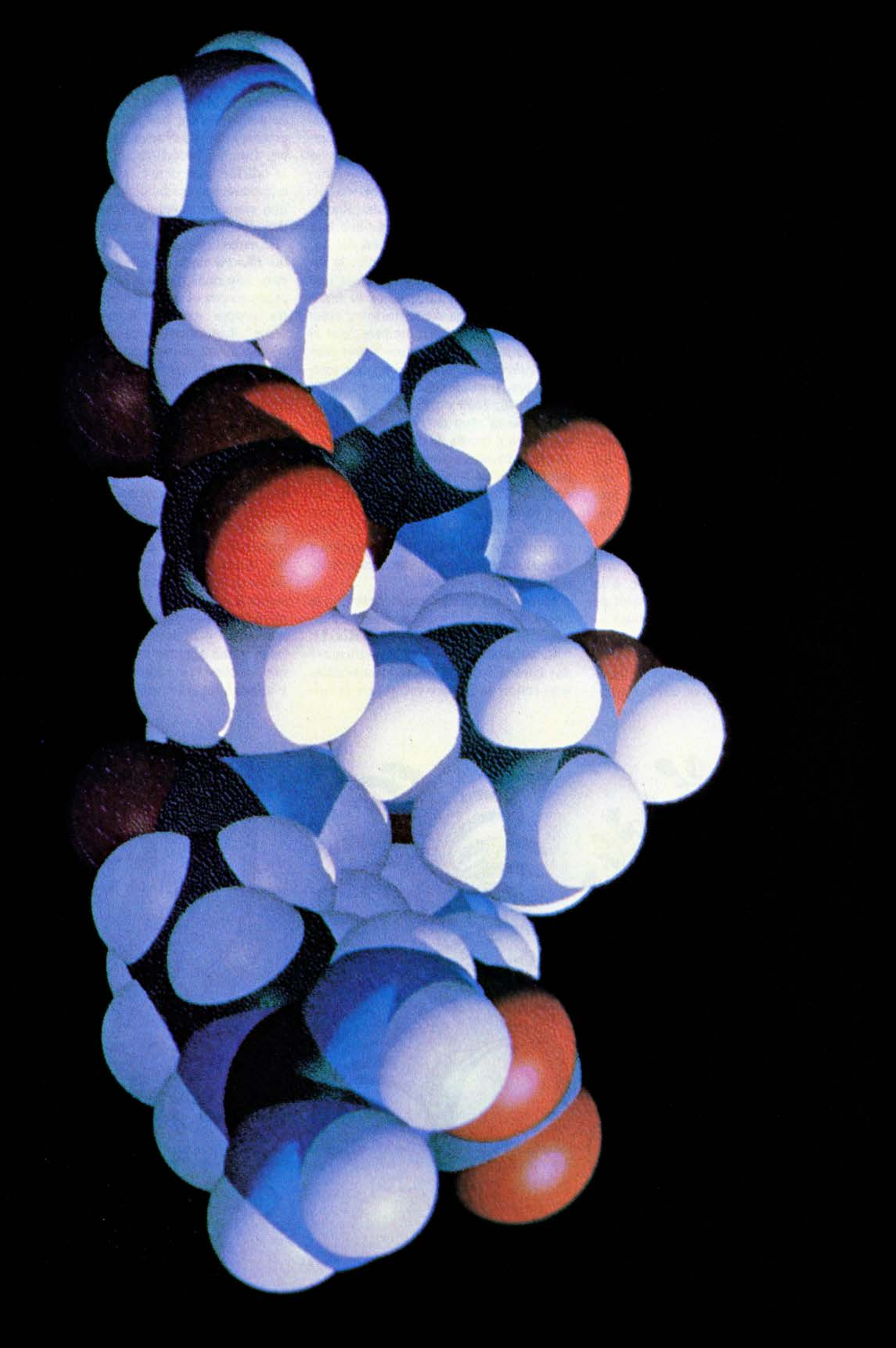
Hernández falleció sin que se cumpliera su gran ilusión de ver impresa su obra sobre la historia natural mexicana. Quedaba también sin publicar el resto de sus numerosos escritos, entre los que destacan los siete volúmenes de su traducción castellana, con amplios comentarios, de la *Historia natural* de Plinio, texto de importancia parecida a la versión que hizo Andrés Laguna de la *Materia médica* de Dioscórides.

Quizá por el enorme gasto que significaba la publicación íntegra de los tomos procedentes de la expedición americana, Felipe II encargó al napolitano Nardo Antonio Recchi que los resumiera. Somolinos considera "nefasta" su labor: "Recchi no estaba preparado para la labor encomendada, desconocía América y no supo interpretar el verdadero valor de los manuscritos de Hernández... Recoge únicamente lo que tenía aplicación a la medicina, y con ello mató el espíritu de la obra". Al terminar el napolitano su trabajo, los originales entregados al rey fueron depositados en la biblioteca de El Escorial, donde al parecer desaparecieron en el incendio de 1671. En poder de Hernández habían quedado borradores o copias de lo entregado.

La impresión del compendio de Recchi no pasó de algunas pruebas. Noticias procedentes del trabajo de Hernández comenzaron a aparecer en obras de médicos residentes en México, hasta que en 1615 Francisco Ximénez, un dominico que trabajaba en el hospital de Huaxtepec, publicó una versión castellana del resumen del napolitano. Trece años más tarde, la famosa Accademia dei Lincei, de la que formaba parte Galileo, editó el texto de Recchi junto a comentarios y estudios de varios de sus miembros, con el título de *Rerum medicarum Novae Hispaniae thesaurus*. A este libro, que apareció con portadas fechadas en 1628, 1630, 1648, 1649 y 1651, se debe la difusión de la obra de Hernández, aunque fuera a través de un resumen poco afortunado. Añadamos que en 1790 se publicaron en Madrid, bajo la dirección de Casimiro Gómez Ortega, los tres volúmenes correspondientes a botánica de una copia original de Hernández. Por desgracia, los dedicados a animales y minerales mexicanos volvieron a quedar inéditos.

Hernández declaró explícitamente la intención de su obra, que choca abiertamente con la amputación de Recchi: "No es nuestro propósito —afirma— dar cuenta sólo de los medicamentos, sino reunir la flora y componer la historia de las cosas naturales del Nuevo Mundo, poniendo ante los ojos de nuestros coterráneos, y principalmente de nuestro señor Felipe, todo lo que se produce en esta Nueva España". Su labor fue, sin hipérbole, gigantesca. En la edición matritense se recogen descripciones suyas de dos mil novecientas una especies vegetales mexicanas, todas ellas basadas en el estudio directo: "En estos libros nuestros de *Historia de las Plantas* nada hay que no hayamos visto con nuestros propios ojos y comprobado por el sabor y olor o por nuestra propia experiencia y la de los otros". Las únicas excepciones, que su propio autor se preocupa de subrayar, son cinco plantas filipinas y seis peruanas, "basadas en el testimonio de testigos oculares muy dignos de fe". Algo parecido puede decirse de los volúmenes sobre animales y minerales. Destaquemos, por último, que el estudio de Hernández está sometido a una pauta metódica rigurosa: "En las descripciones —afirma hablando de las plantas— se toca con la brevedad que conviene la forma de la raíz, ramas, hojas, flores y simiente o fruto, la cualidad o grado della, sabor, olor y virtud, según la relación de los indios médicos, medido con la experiencia y reglas de medicina, y la región y partes do se crían y aun algunas veces el tiempo en que se cogen, cuantidad que se aplica y manera de cultivarlas".





# Prevención del rechazo de trasplantes

*¿Se puede evitar la destrucción de los trasplantes? Los avances recientes en el conocimiento de la función del complejo principal de histocompatibilidad y en la predicción de determinantes permiten confiar en las vacunas sintéticas*

Serafín Fraga, Luis Seijo, Mercedes Campillo y Bhagirath Singh

Los vertebrados, humanos incluidos, en cuanto advierten la presencia de una substancia extraña en el cuerpo (un antígeno), inician un complejo proceso de defensa: la respuesta inmune. Aunque desde hace tiempo se sabía que las inmunoglobulinas (anticuerpos) desempeñaban un papel fundamental en la respuesta –a través de su unión con los antígenos–, es reciente el conocimiento de la implicación de otras moléculas en ese proceso. Algunas de estas moléculas han recibido el nombre de antígenos de histocompatibilidad, ya que las células y los tejidos en que aparecen son rechazados si se trasplantan a un individuo cuyas correspondientes moléculas no son exactamente iguales. Los antígenos de histocompatibilidad definen la individualidad del sujeto y varían, en consecuencia, de unos individuos a otros. El conjunto de genes que determinan dichas moléculas constituye el así llamado complejo principal de histocompatibilidad (*CPH*).

El rechazo de trasplantes es, pues, una manifestación de la respuesta inmune en el reconocimiento de la diferente identidad.

Por antígeno podemos entender la substancia que penetra en el cuerpo y actúa como agente inmunogénico, o bien la substancia que reacciona con un anticuerpo presente en el organismo. Ambas propiedades, inmunogenicidad y especificidad antigénica, definen la calidad de antígeno, la antigenicidad. Un antígeno puede poseer especificidad antigénica, es decir, tendencia a unirse con determinado anticuerpo, sin ser aquél inmunogénico. La inmunogenicidad depende de que el animal responda o no ante la presencia de objetos extraños en su propio cuerpo.

Las zonas de la molécula invasora responsables de la antigenicidad se conocen por determinantes antigénicos. Los hay secuenciales y conformacionales, sobre todo si se trata de proteínas. (Pensemos, por ejemplo, en la proteína de la cápside envolvente de un virus.) Los determinantes antigénicos secuenciales están constituidos por aminoácidos que ocupan posiciones adyacentes en la secuencia de la proteína; los determinantes antigénicos conformacionales, por su parte, lo están por aminoácidos cuya proximidad débese a la topología de la proteína, pero no a la secuenciación propia.

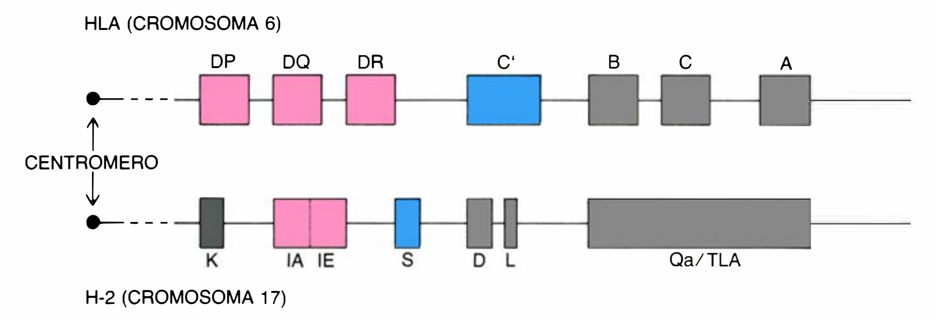
Los determinantes antigénicos, por sí solos, provocan una respuesta inmune equivalente a la que desencadena la proteína completa. Dicho con un ejemplo: en el caso de un virus los determinantes antigénicos, preparados sintéticamente, inducen una respuesta imune sin el riesgo que comporta la infección vírica. La identificación de los determinantes constituye, por tanto, un requisito para el desarrollo de vacunas sintéticas.

## Linfocitos

En cuanto una molécula invasora penetra en el cuerpo, acuden a su identificación los macrófagos. Estos transfieren la información recabada a los linfocitos, que son las células de la reacción inmune. Todos los linfocitos que circulan por los tejidos han surgido de células precursoras existentes en la médula ósea. Alrededor de la mitad de ellos, las células *T*, han pasado por el timo en su camino hacia los tejidos; la otra mitad de linfocitos, las células *B*, no pasan por el timo. Unos y otros, morfológicamente indistinguibles, divergen por razón de su función. Las células *T* tienen a su cargo las reacciones celulares de inmunidad y se subdividen, a su vez, en coadyuvantes, destructores, multiplicadores y supresores, de acuerdo con la diversa misión que desempeñan. Sólo las células *B* y las de su progenie sintetizan y segregan anticuerpos. La degradación previa del antígeno invasor por parte de la célula *T* no constituye una condición esencial para la activación de las células *B*, pero éstas suelen necesitar la ayuda de las *T* para la producción de anticuerpos.

Las inmunoglobulinas son las moléculas de anticuerpos y poseen características estructurales que reflejan su función. Una molécula de anticuerpo consta de dos tipos de cadenas relacionadas: pesada y ligera. Todo anticuerpo tiene una de las siguientes clases de cadenas pesadas: mu, delta, gamma, épsilon y alfa. El tipo de cadena pesada define la clase de inmunoglobulina: IgM, IgD, IgG, IgE o IgA. Las cuatro cadenas –dos pesadas y dos ligeras– que constituyen las distintas inmunoglobulinas están unidas por puentes de disulfuro (S–S). Distintamente de como ocurre con las cadenas pesadas, que son específicas de cada inmunoglobulina, las cadenas ligeras son similares en todos estos anticuerpos. Tanto las cadenas ligeras como las pesadas de IgG, que son las inmunoglobulinas más importantes, presentan regiones de secuencia constante y variable, con subregiones hipervariables dentro de las regiones va-

**1. SINTESIS EXPERIMENTAL DE UN POLIPEPTIDO que induce una respuesta inmune. Corresponde a la región 61-69 de la molécula H-2K$^{b}$ del ratón. Si a un paciente se le inyectara, antes de realizar el trasplante, anticuerpos preparados contra ese polipéptido sintético u otros, el tratamiento podría inducir la aparición de células *T* supresoras, o anticuerpos anti-idiotípicos, que protegerían del rechazo el transplante.**




**2. REGIONES DEL COMPLEJO PRINCIPAL DE HISTOCOMPATIBILIDAD (*CPH*), en representación esquemática. Dichas regiones codifican el sistema de reconocimiento de los antígenos. En ratones, los sistemas se designan por *H-2* y, en humanos, por *HLA*. El complejo *H-2* se divide en las siguientes regiones: K, I, S, D, L y TLA, con la región I subdividida en las subregiones A y E. Las regiones del complejo *HLA* se denominan, a su vez, A, B, C, C' y D, esta última subdivida en las subregiones DP, DQ y DR. Los recuadros en color rojo corresponden a las regiones que codifican los antígenos de clase II; en azul, los antígenos de clase III (no examinados en este trabajo); en gris, aparecen las regiones correspondientes a los antígenos de clase I.**

riables de ambos tipos de cadenas. El contacto entre la inmunoglobulina y el antígeno se produce en dichas regiones, estando formado el receptor por zonas de ambas cadenas.

Los linfocitos presentan en su superficie receptores del tipo de las inmunoglobulinas, dotados de la misma especificidad hacia el antígeno que el anticuerpo que será segregado por la célula una vez diferenciada. (No todos los linfocitos segregan anticuerpos. En realidad, el 98 por ciento no lo hacen nunca; esa actividad está reservada a los linfocitos "pequeños", células esféricas que miden una centésima de milímetro de diámetro. Para segregar anticuerpos un linfocito tiene que aumentar de tamaño.)

Cuando el antígeno es presentado a los linfocitos *B*, las células dotadas de receptores para el antígeno, estimuladas, se ven inducidas a diferenciarse y dan lugar a células que producirán anticuerpos con especificidad hacia los antígenos que han provocado la estimulación. Cumplidas ya las fases de selección, diferenciación y proliferación de las células *B*, estas últimas producen los anticuerpos necesarios que van a parar a la circulación. Los anticuerpos reconocerán a los antígenos estimuladores y los neutralizarán a través de la formación de un complejo antígeno-anticuerpo. Un animal que ha llegado a la madurez sexual produce un número considerable de posibles anticuerpos en razón de la existencia de regiones de secuencia variable en las cadenas de las inmunoglobulinas. A mayor número de especificidades hacia los antígenos, mayor número de regiones que pueden sintetizarse.

Las células *T* revisten una importancia capital en el proceso inmunitario. Reconocen incluso determinantes antigénicos y poseen, en consecuencia, moléculas de anticuerpo como receptores de superficie. En la respuesta inmune celular, los linfocitos *T* atacan y destruyen las células infectadas por virus. Son los responsables también de la destrucción de los tejidos trasplantados. Los dos pasos fundamentales en el desarrollo de las respuestas controladas por células *T* son el estímulo inicial de los linfocitos *T* ayudantes por parte de los macrófagos que contienen a los antígenos invasores y el estímulo subsiguiente de los linfocitos ejecutores (células *T* citotóxicas) por las células ayudantes. Estudios recientes han puesto de manifiesto que estos dos procesos están controlados por los antígenos del complejo principal de histocompatibilidad (*CPH*) del animal invadido.

## El complejo principal de histocompatibilidad

La respuesta inmune es una consecuencia de la habilidad de los organismos para distinguir todo aquello que no constituye parte de su identidad. Esta capacidad discriminatoria reside en estructuras localizadas en las superficies de las células, que reconocen lo que es extraño al organismo e inducen procesos que resultan en su destrucción. En los mamíferos, los sistemas de reconocimiento están codificados por una región del cromosoma denominada *complejo principal de histocompatibilidad*; se les conoce por *H*-2 en ratones y *HLA* (del inglés *human lymphocyte antigen*) en el hombre. El complejo *H*-2 está dividido en las regiones K, I, S, D, L y TLA, con la región I subdividida en dos subregiones A y E. Las regiones del complejo *HLA* se denominan A, B, C, C′ y D, esta última subdividida en las subregiones DP, DQ y DR.

Los productos del *CPH*, denominados moléculas o antígenos del *CPH*, intervienen en la organización de las células del organismo. Dicho de otra manera, el autorreconocimiento es un fenómeno general de las células bajo el control del *CPH*. Además, intervienen en el rechazo de trasplantes y en la regulación de la respuesta inmune; controlan, pues, la interacción entre las células inmunogénicas y la capacidad de responder a ciertos antígenos o determinantes antigénicos y se encargan de la vigilancia contra células infectadas por virus y de la destrucción de células cancerígenas, de células embrionarias en la sangre de la madre y de células con parásitos intracelulares.

Los productos de las regiones H-2K, H-2D y H-2L del ratón y de las regiones HLA-A, HLA-B y HLA-C del hombre, con estructuras y funciones análogas, reciben el nombre de antígenos de clase I (o de trasplante). Estas moléculas, altamente polimórficas y que existen en la inmensa mayoría de células con núcleo, son las responsables de la individualidad, integridad y cohesión general del invididuo, provocan el rechazo de órganos trasplantados y sirven de blanco cuando una célula se encuentra infectada por un virus.

Los productos de la región I del ratón (subregiones IA e IE, denominados genes de la respuesta inmune o *Ir*) y los productos de la región HLA-D del hombre (subregiones DP, DQ y DR) son también análogos y se denominan antígenos de clase II, aunque la designación de antígenos asociados (*Ia*) con la región I también suele ser utilizada para el ratón. La región I del ratón regula la capacidad de respuesta inmune, así como la susceptibilidad a la oncogénesis vírica y a ciertas enfermedades que tienen una patogénesis inmunológica. De un modo semejante, varias enfermedades autoinmunes (artritis reumatoide, diabetes mellitus y myasthenia gravis –enfermedad autoinmune que afecta a la transmisión neuromuscular–) están asociadas con la región HLA-D del hombre.

## Antígenos del *CPH*

En estos últimos años se ha acumulado una información considerable, aunque todavía incompleta, sobre las características estructurales, función y polimorfismo de las moléculas del *CPH* y se están consiguiendo avances espectaculares en la identificación de sus determinantes antigénicos.

Los antígenos de clase I están formados por la asociación (no covalente) de una glicoproteína, codificada por el *CPH*, de 44-48 kilodalton de peso molecular, y microglobulina $\beta_2$ ($\beta_2 m$), de 12 kilodalton de peso, que no es codificada por el *CPH*. Las cadenas pesadas, con más de 300 aminoácidos, constan de una región extracelular (con

unos 280 aminoácidos), una región hidrófoba que atraviesa la membrana celular (con unos 20 aminoácidos) y una región hidrofílica citoplásmica (con unos 40 aminoácidos). La región extracelular, donde se encuentran localizados los determinantes antigénicos, queda dividida en tres regiones: aminoácidos 1-90, 91-180 y 181 hasta el final de la región; se denominan *α1, α2* y *α3* en los productos de *HLA,* y *N, C1* y *C2* en los de *H*-2.

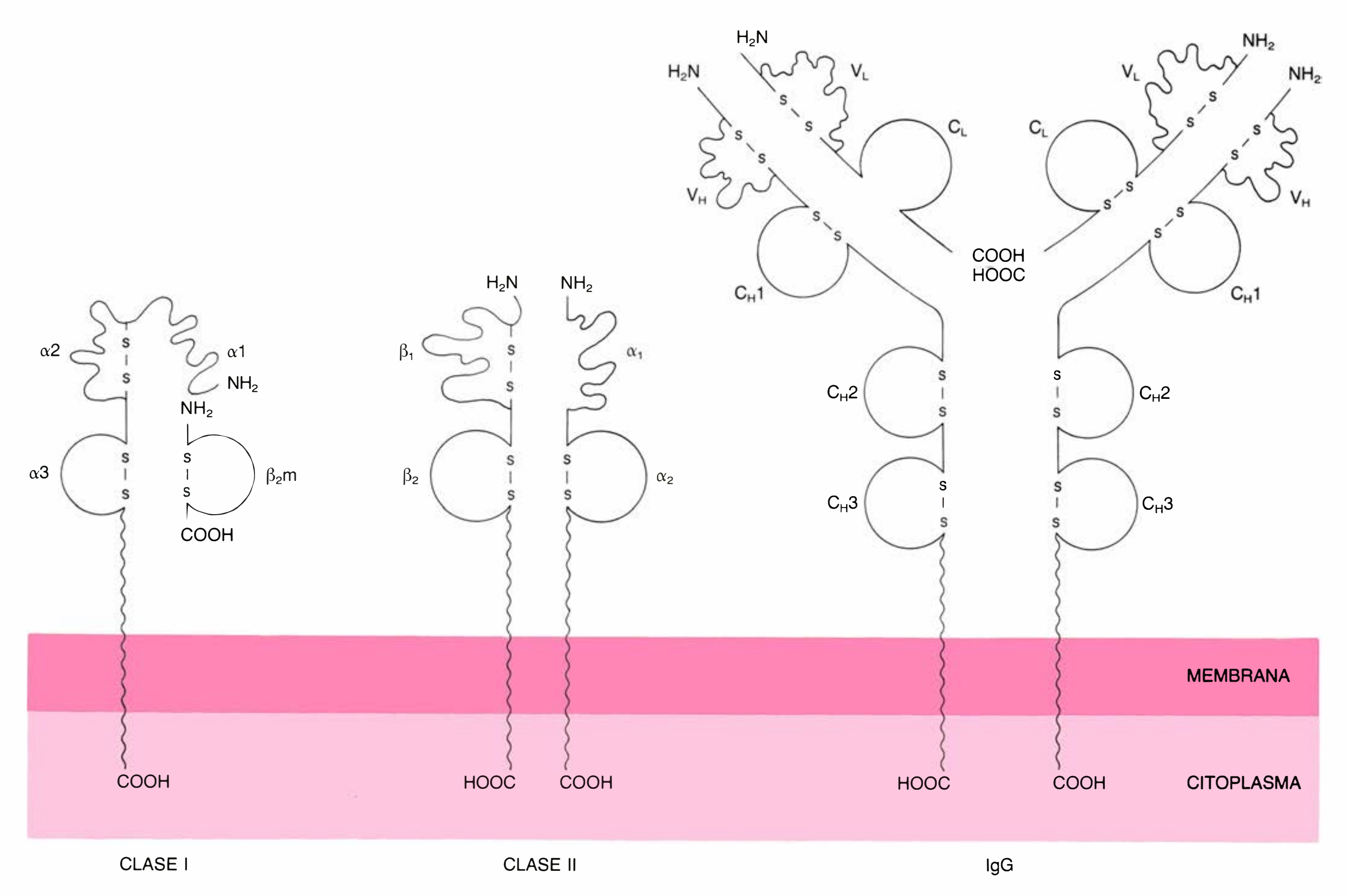
La región *α1/N* lleva un hidrato de carbono unido al aminoácido 86, tanto en el hombre como en el ratón, con un segundo hidrato de carbono unido al aminoácido 176 en los antígenos del ratón. Las regiones *α2/C1* y *α3/C2* contienen, cada una, un puente de disulfuro. Las regiones que atraviesan la membrana no poseen aminoácidos con carga ni aminoácidos polares, mientras que la región citoplásmica es rica en aminoácidos polares, con un conjunto de aminoácidos básicos (a continuación de la zona hidrófoba), que probablemente interaccionan con fosfolípidos cargados negativamente, y fija la molécula al citoplasma. Existen también cisteínas, que pueden interaccionar covalentemente con los componentes citoplásmicos. La microglobulina $\beta_2$, que interacciona con la región *α3/C2*, no penetra en la membrana.

Los antígenos de clase II tienen dos cadenas, unidas por fuerzas no covalentes, con pesos de 32-35 kilodalton (cadena $\alpha$) y 25-28 kilodalton (cadena $\beta$). Ambas cadenas penetran en la célula. En ciertos casos se ha aislado también (junto con moléculas de la región I del ratón) una tercera cadena, de 31 kilodalton, estructuralmente invariante sea cual sea el haplotipo o alelos de que consta la región. Las cadenas $\alpha$ y $\beta$ están formadas por dos regiones extracelulares ($\alpha_1$, $\alpha_2$ y $\beta_1$, $\beta_2$, respectivamente), una región que atraviesa la membrana celular y una región citoplasmática, con puentes de disulfuro en las regiones $\alpha_2$, $\beta_1$ y $\beta_2$.

Las moléculas de clase II sirven de agentes selectivos, que posibilitan que las células *T* reguladoras (ayudantes, supresoras y multiplicadoras) distingan a los antígenos invasores (por contraste con su propia identidad) en la superficie de otras células *T*, células *B* o macrófagos. Estas moléculas pueden reconocer ciertas secuencias de aminoácidos en los antígenos invasores. Reconocimiento que se traduce en la formación de complejos entre el antígeno invasor y la molécula de clase II. Cuando un macrófago presenta un antígeno invasor (formando parte de tal complejo) a los linfocitos ayudantes $T_a$, éstos, estimulados, sufren una diferenciación y proliferan. Las células $T_a$, a su vez, pueden inducir la replicación de las células *B*, que se diferenciarán en células secretoras de anticuerpos. Las respuestas independientes de las células *T*, que resultan de la activación directa de los linfocitos *B* por el antígeno invasor, no quedan bajo el control de las moléculas de clase II. Hay que hacer resaltar que un número reducido de sitios receptores en un número pequeño de moléculas de clase II puede generar, para los antígenos disponibles, un número casi sin límite de determinantes reconocidos específicamente por las células *T*.

## Moléculas de clase I

Las células infectadas por virus estimulan la transformación de las células *T* precursoras en células citotóxicas (o




**3. ESTRUCTURA DE LA INMUNOGLOBULINA GAMMA y de los antígenos de clase I y II del complejo principal de histocompatibilidad. Tanto las cadenas ligeras (subíndice *L*) como las pesadas (subíndice *H*) de la inmunoglobulina gamma (IgG) presentan regiones de secuencia constante (*C*) y variable (*V*), con subregiones hipervariables dentro de las regiones variables de ambos tipos de cadenas. Los antígenos de clase I están formados por la asociación de una glicoproteína y una microglobulina. Los antígenos de la clase II tienen dos cadenas; ambas penetran en la célula. S-S indica puentes de disulfuro.**

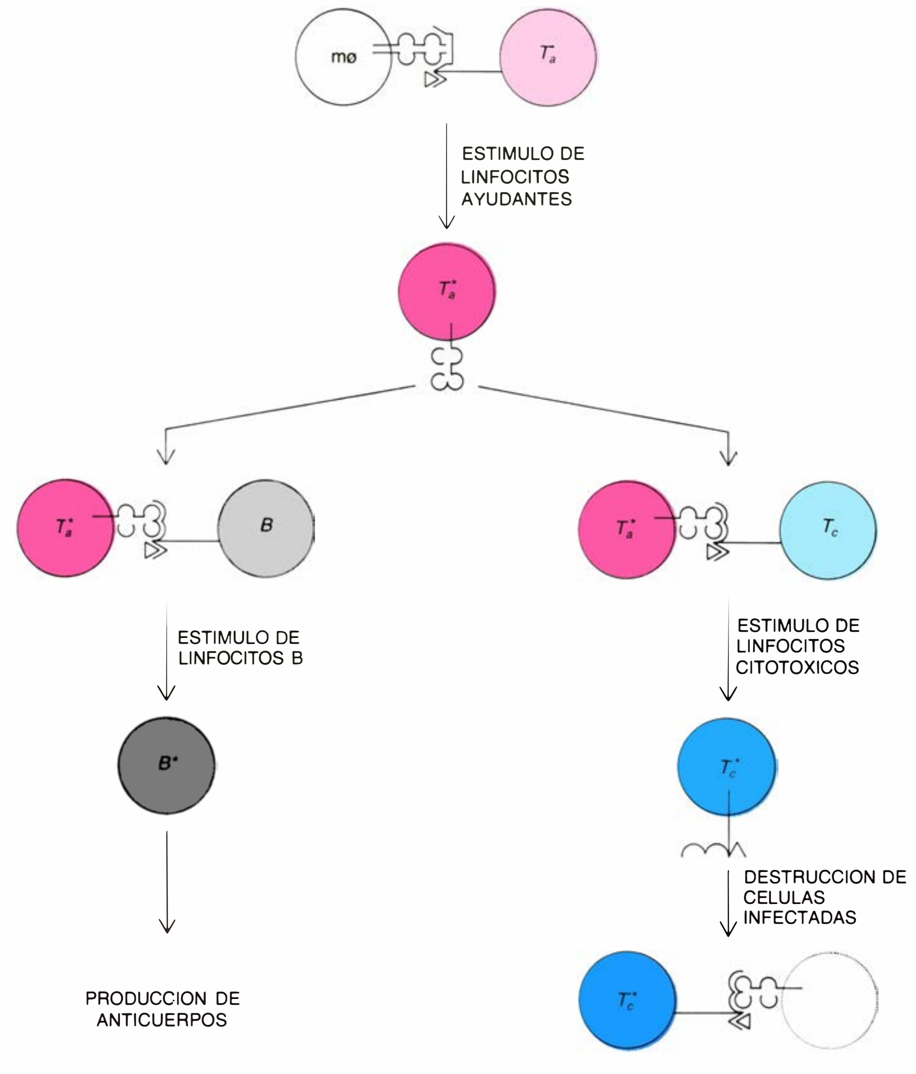
citolíticas) $T_c$. La respuesta inmune contra un virus depende de la capacidad de presentar a los antígenos víricos en conjunción con los antígenos de clase I del animal invadido. Hay una especificidad celular eficaz controlada por las moléculas de clase I. La presencia de células ayudantes $T_a$ es imprescindible para la activación de las células $T$ precursoras. Un linfocito ejecutor maduro aprende a reconocer los antígenos víricos en asociación con los antígenos de trasplante de la célula que presenta al antígeno. Este aprendizaje tiene lugar en el timo. Después, los linfocitos $T_c$ maduros sólo destruirán las células infectadas con el mismo virus que posean los mismos antígenos de trasplante que las células estimuladoras.

Probablemente, los linfocitos ejecutores no actúan solos, sino que requieren la colaboración de linfocitos ayudantes. Es decir, existe una cooperación en el control de la especificidad de los linfocitos que intervienen en la respuesta inmune celular a infecciones víricas, en la que los antígenos de clase I controlan la especificidad de los linfocitos ejecutores y los antígenos de clase II controlan la especificidad de los linfocitos ayudantes.

Aunque no se sabe exactamente si existen receptores individuales para los antígenos de trasplante y para los antígenos invasores, o si sólo hay un receptor único para los antígenos de trasplante en asociación con el antígeno invasor, las pruebas disponibles abonan la segunda posibilidad, conocida por teoría de identidad alterada o de un solo receptor.

De una manera esquemática la secuencia de pasos sería la siguiente. Los macrófagos presentan el complejo formado por la molécula de clase II y el antígeno invasor al linfocito $T_a$, que es estimulado, diferenciándose y proliferando a continuación. Las células $T_a$ diferenciadas ayudan después a las células precursoras de las células citolíticas $T_c$ y a los linfocitos $B$. Las células $T_c$ se diferencian y proliferan, reconociendo y destruyendo después aquellas células infectadas que presenten en sus superficies el mismo complejo de molécula de clase I y antígeno invasor. Por otra parte, los linfocitos $B$ se transforman en células que proliferarán y segregarán anticuerpos específicos para ese mismo antígeno invasor.

La variación de la respuesta inmune está controlada por las regiones I y D del ratón y del hombre, respectivamente. El individuo que no ofrezca respuesta inmune puede ser transformado en uno con una respuesta reforzada mediante inmunización con un antígeno unido a otra molécula; por contra, la preinmunización de tales animales con el antígeno aislado suprime en la mayoría de los casos la respuesta al antígeno asociado. La falta de respuesta está controlada a veces por las células $T$ supresoras.




**4. SECUENCIA DE PASOS en la respuesta inmune celular, con intervención de células $T_a$ (ayudantes), $T_c$ (citotóxicas) y $B$; las moléculas del complejo principal de histocompatibilidad desempeñan en ellas un papel decisivo. Los macrófgaos (m∅) presentan el complejo antígeno invasor-antígeno de clase II a los linfocitos ayudantes ($T_a$), que quedan estimulados. Estas células, a su vez, presentan el complejo antígeno invasor-antígeno de clase I tanto a los linfocitos $B$ como a las células precursoras de los linfocitos citotóxicos $T_c$.**

## Polimorfismo

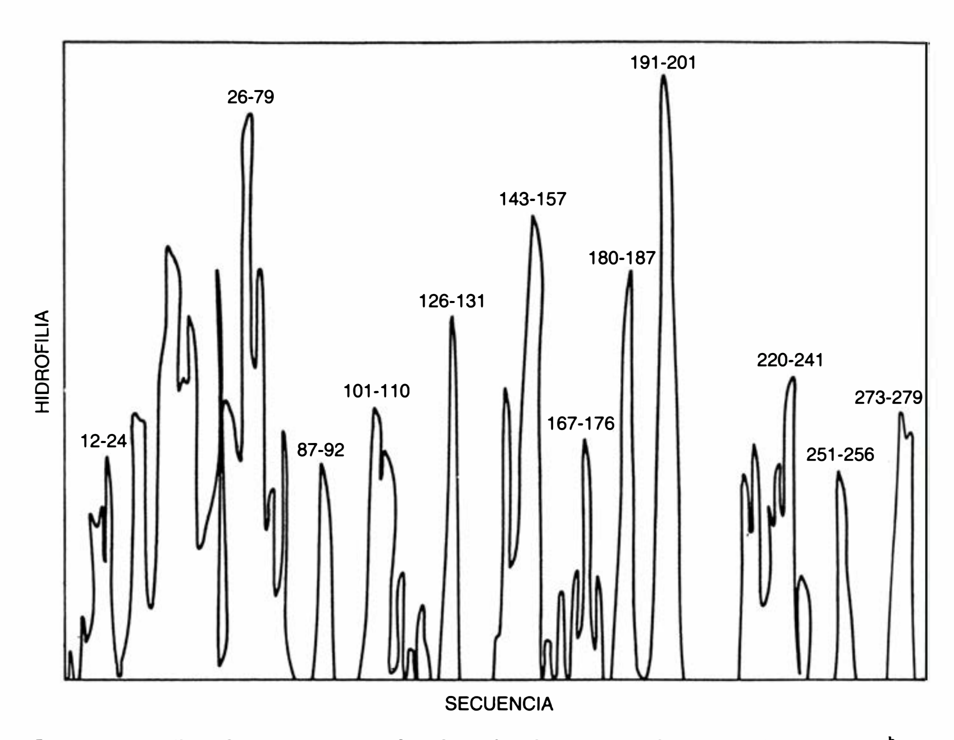
El reconocimiento de los antígenos invasores en el contexto de los antígenos de trasplante del animal invadido sugiere cuál es su función y la razón de ser del polimorfismo o variedad de formas que presenta. El proceso de reconocimiento sirve para centrar la atención de las células ejecutoras en la célula infectada y no en las partículas víricas aisladas. Se logra así una mayor eficacia en la lucha contra la infección. El polimorfismo incrementa el repertorio de moléculas disponibles para el reconocimiento por asociación y ciertas moléculas del *CPH* pueden ser más apropiadas que otras, procedentes de la misma o de otra región del gen, para presentar un antígeno determinado. La habilidad de ciertos antígenos de clase I para asociarse con proteínas víricas específicas podría ser la fuerza motriz del polimorfismo genético de las moléculas de clase I: cuantas más moléculas de clase I haya, más probable será que una de ellas se asocie con la proteína vírica.

La región H-2K del ratón doméstico consta de 56 alelos, y de 45 la región H-2D; se alcanza, pues, un total de unas 2500 combinaciones. Considerando el alto grado de heterozigosis y el hecho de que existen muchas regiones en el complejo *H-2*, queda manifiesta la extraordinaria variabilidad de este com-

plejo, hecho que no puede explicarse apelando a mutaciones recientes. Los correspondientes productos del gen son identificados con un superíndice para el haplotipo (combinación de alelos); por ejemplo: H-2K$^{b}$. En el hombre, cada una de las cuatro regiones (A, B, C y D) tiene de 8 a 39 alelos codominantes y el número de combinaciones haplotípicas o genotípicas se cuenta por millones. Es decir, considerando el polimorfismo de los otros genes en la región *HLA*, se puede afirmar que cada persona tiene una combinación diferente.

Para las posiciones 1-90 de la secuencia, las moléculas de *H-2* tienen una homología del 74 al 93 por ciento, las moléculas de *HLA* concuerdan en un 86-91 por ciento de los aminoácidos y existe una homología del 67 al 73 por ciento entre las moléculas de *H-2* y las de *HLA*. Se observa la variabilidad más elevada para las posiciones 61-83, así como para las posiciones 9, 30-32 y 89. Para las posiciones 91-180, existe diversidad en las posiciones 95-99, 114-116 y 152-157 (con la máxima variabilidad en las posiciones 97, 99 y 114) para las moléculas de *H-2*, con una situación semejante para las moléculas de *HLA*, aunque muestran menos variabilidad.

Las posiciones 180-274 son altamente constantes (probablemente debido a que han de interaccionar con la microglobulina $\beta_2$, que no es polimórfica en el hombre), con algo de variabilidad en las posiciones 193-198 y 255-268 en el ratón. La homología entre diferentes especies es muy baja para la región que atraviesa la membrana. En la región citoplasmática se observa una homología elevada entre las moléculas de *H-2* y entre las de *HLA*. La divergencia de secuencia entre las moléculas de *H-2* y las de *HLA* desde la posición 275 hasta el extremo carboxílico final indica que no existen restricciones estructurales en esta región. En el caso de antígenos de clase II, la mayoría de las diferencias aparecen en la primera región externa, con muy poca variabilidad para la segunda región extracelular cuya estructura semeja la de un anticuerpo.

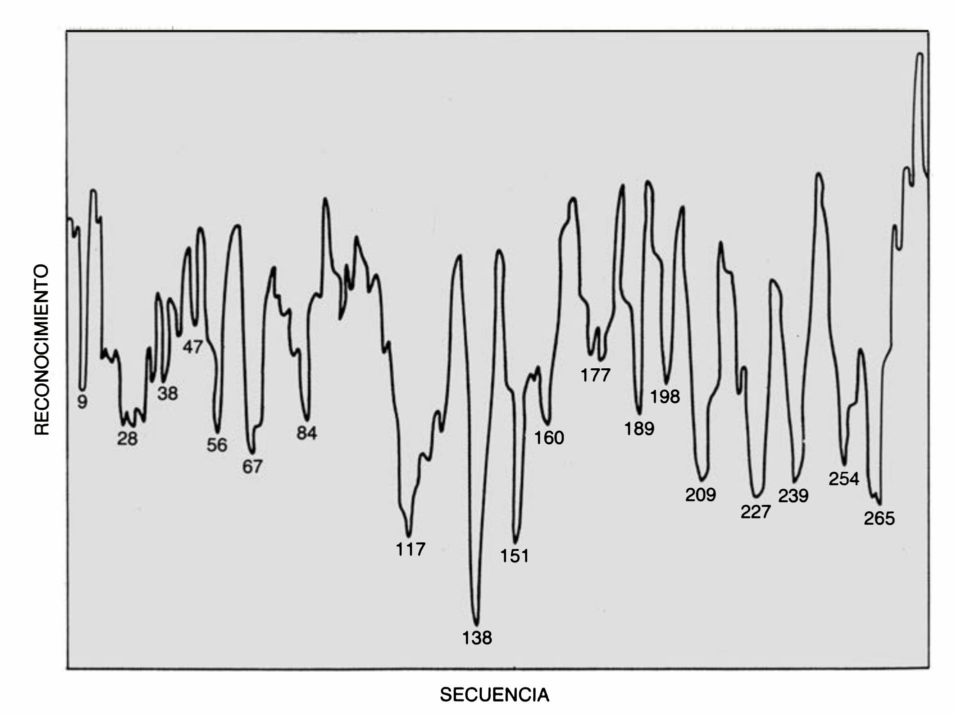



**5. PERFIL DE HIDROFILIA DEL ANTIGENO DE CLASE I (DE TRASPLANTE) del ratón, H-2K$^{b}$. La región H-2K del ratón doméstico consta de 56 alelos. El superíndice *b* remite al haplotipo en cuestión. Por sencillez de la representación se han omitido las partes del perfil correspondientes a hidrofilias negativas. Los números señalan las regiones de la secuencia que están caracterizadas por su hidrofilia positiva.**

## Rechazo de trasplantes y enfermedades autoinmunes

Los antígenos de trasplante y la inmunoglobulina parecen tener un origen evolutivo común. La región *α3* presenta escasa homología, aunque estadísticamente significante, con las regiones constantes de la inmunoglobulina. La región homóloga puede servir de unidad de reconocimiento básico para las interacciones celulares.

Las moléculas del *CPH* intervienen en el rechazo de trasplantes y en más de cincuenta enfermedades autoinmunes. Se ha observado que existe una correlación entre la supervivencia de los trasplantes de piel y el número de incompatibilidades HLA-A, HLA-B y HLA-C. Además, una incompatibilidad de la región HLA-D suele ir acompañada por un descenso en el índice de supervivencia de los trasplantes, con un evidente efecto aditivo con las incompatibilidades antes mencionadas. La incompatibilidad de la región HLA-D provoca el ataque de las células citotóxicas; en ese sentido, los antígenos de la región HLA-




**6. PERFIL DE RECONOCIMIENTO del antígeno de clase I (de trasplante) del ratón, H-2K$^{b}$. Los números indican las posiciones de la secuencia correspondientes a los mínimos más importantes en este perfil.**

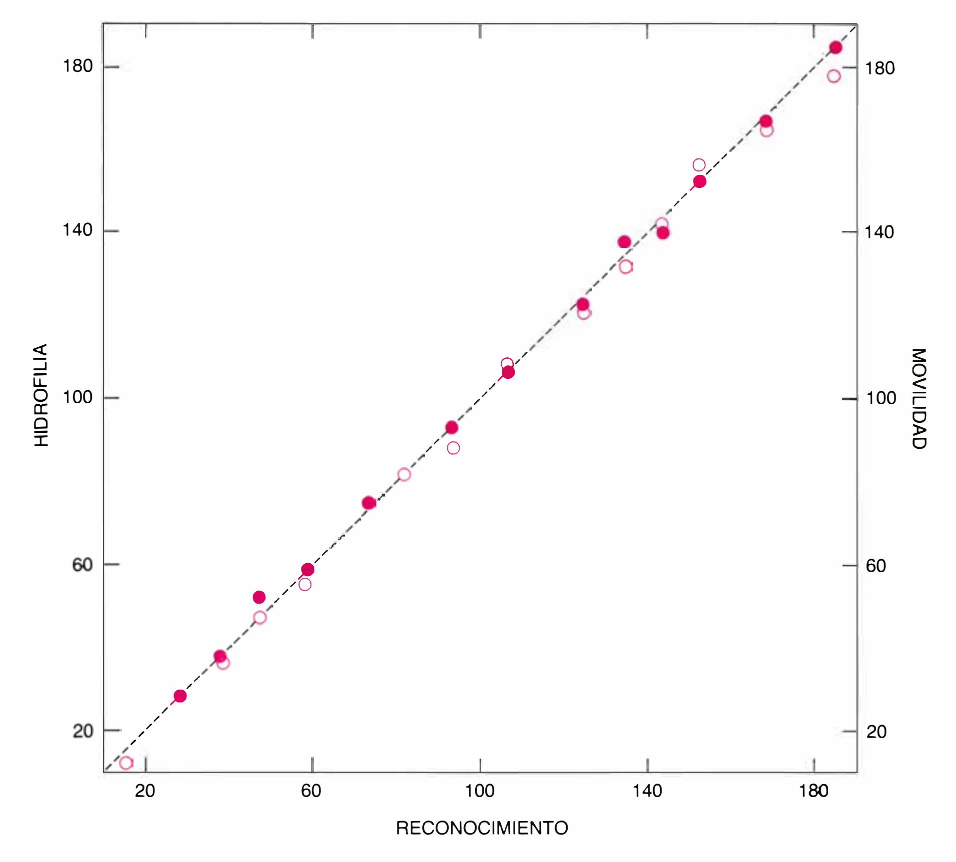
D constituyen verdaderos blancos para el ataque, sin requerir la identidad HLA-A, HLA-B y HLA-C de las células atacantes y el blanco. La disparidad en la región HLA-D induce la aparición de células auxiliares (ayudantes y supresoras) y aunque, corrientemente, las células ayudantes dominan sobre las células supresoras, en ciertas ocasiones estas últimas dominan sobre aquéllas.

En lo que se refiere a la prevención del rechazo de trasplantes, los esfuerzos se han encaminado a provocar en el paciente una tolerancia específica a los antígenos incompatibles del donante sin reducir al mismo tiempo las defensas inmunológicas. Parece ser que se puede alcanzar dicho objetivo mediante transfusiones preoperatorias, con lo cual se estimula la producción de células supresoras. Se trata de lograr el estado de tolerancia del paciente, evitando, al propio tiempo, la inmunización contra los blancos HLA-A, HLA-B y HLA-C. Y así hay que realizar las transfusiones sanguíneas con incompatibilidad HLA-DR, pero con compatibilidad de los blancos citados.

Al seleccionar al donante del órgano se procura evitar ofrecer blancos contra los cuales el paciente pueda ser inmunizado. Por esta razón se da prioridad a la compatibilidad HLA-DR en los pacientes que no han producido anticuerpos contra los antígenos HLA-A, HLA-B y HLA-C en el curso de las transfusiones (pacientes sin respuesta); existe una probabilidad muy pequeña de que se produzca una inmunización contra estos tres antígenos, pero hay que evitar la aparición de células ayudantes y de blancos de la región HLA-D. Por otra parte se da prioridad a la compatibilidad HLA-A, HLA-B y HLA-C para los pacientes que han quedado sensibilizados en el curso de las transfusiones preoperatorias (pacientes con respuesta); las células ayudantes están presentes y es preciso no aportar blancos HLA-A, HLA-B y HLA-C a fin de neutralizar su acción.

En el futuro, sin embargo, se espera conseguir la prevención del rechazo de trasplantes, así como la relativa a las enfermedades autoinmunes mediante vacunas sintéticas. De hecho, ya se está aplicando este procedimiento, en modelos experimentales, a propósito del trasplante de médula ósea, con tratamiento del paciente con anticuerpos preparados contra sus propios antígenos de clase I (de trasplante). Este tratamiento evita el rechazo de la médula trasplantada.

¿Caben procedimientos semejantes para el tratamiento de enfermedades autoinmunes y para la protección de trasplantes? La respuesta es afirmativa. En el caso de enfermedades autoinmunes el paciente puede ser inyectado con anticuerpos, preparados contra sus propios antígenos de clase II, que bloquearán o neutralizarán las células que participan en la respuesta autoinmune. Este método ha tenido éxito en modelos experimentales para el tratamiento de diabetes, lupus y encefalomielitis autoinmune, que es un tipo de esclerosis múltiple. Para la protección de trasplantes, el paciente podría ser inyectado, antes de la operación, con péptidos que simularan los determinantes antigénicos de los antígenos de clase I del donante o bien con anticuerpos preparados contra dichos antígenos.




**7. RELACIONES ENTRE TRES PARAMETROS: hidrofilia, reconocimiento y movilidad para el fragmento cristalizado de inmunoglobulina IgG humana. Los factores de hidrofilia representan cantidades semiempíricas que reflejan el carácter hidrofílico/hidrófobo de los aminoácidos. El factor de reconocimiento de cada residuo aminoacídico representa la media de las energías de estabilización de todas las asociaciones bimoleculares de dicho resto con todos los demás. Los factores o de movilidad incluyen contribuciones de vibraciones térmicas, desorden en el cristal y variabilidad conformacional de las moléculas del mismo.**

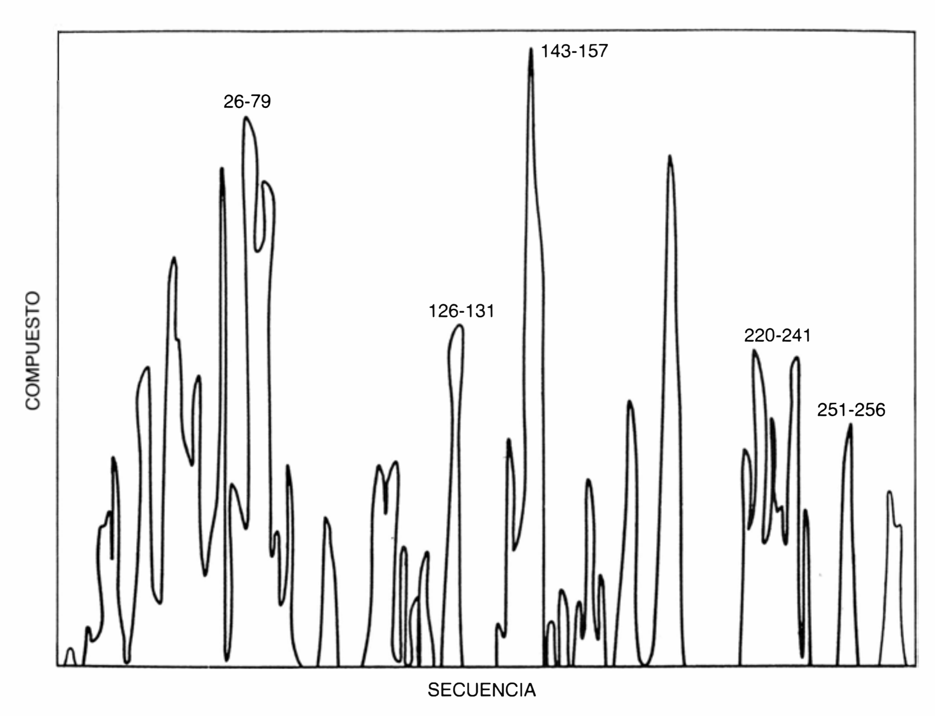
## Determinantes antigénicos

¿Cuáles son las regiones de los antígenos del *CPH* portadoras de sus propiedades de reconocimiento? Para responder a la pregunta se ha intentado, buscando rechazos inesperados, identificar mutaciones en las moléculas de clase I del ratón. El hilo conductor del razonamiento era que la identificación bioquímica de los cambios estructurales en las moléculas mutantes nos llevaría a localizar la región de la molécula cuyo polimorfismo serviría de señal específica para el reconocimiento por el sistema inmune. Diecisiete de las treinta mutaciones que se han encontrado para *H-2* corresponden al gen de $H\text{-}2K^b$ (serie *bm*). Ninguno de los mutantes difiere de la molécula original en más de tres aminoácidos y todos los intercambios tienen lugar en las posiciones de variabilidad en las moléculas de clase I de *H-2*. Los datos sugieren la existencia de determinantes, afectados por los aminoácidos en las posiciones 152, 155, 156 y 165, seguidos por los de las posiciones 22, 23, 24, 77 y 89, así como por los aminoácidos de las posiciones 116 y 121. (Se llama determinantes antigénicos o epitopos a las conformaciones específicas que son reconocidas por las moléculas de anticuerpo.)

La conformación desempeña un papel crítico en el reconocimiento por los linfocitos *T* citotóxicos. Sin un conocimiento detallado de la estructura tridimensional de los antígenos de histocompatibilidad es imposible afirmar si

las regiones de variabilidad constituyen una sola región antigénica o si hay distintas zonas, antigénica cada una de ellas. Una pregunta relacionada con la anterior es la siguiente: ¿se debe el efecto de las sustituciones de aminoácidos a que éstos forman parte de los determinantes o a que inducen cambios conformacionales en otras partes de la molécula, que actúan entonces como determinantes?

La identificación de los determinantes ha de fundarse, en último término, en los resultados experimentales de ensayos inmunológicos. Ahora bien, las observaciones anteriores ponen de manifiesto que un conocimiento de la estructura tridimensional de la proteína puede reducir el costo del trabajo experimental. Si no se dispone de dicha información, cabe recurrir a otras opciones. Un método teórico de simulación por ordenador, rápido y económico constituye la mejor alternativa. En nuestro laboratorio de la Universidad de Alberta hemos diseñado un método de estas características, con el que se pretende identificar tanto los determinantes secuenciales como los conformacionales. Está basado en el uso de perfiles y en la predicción teórica de la estructura espacial de proteínas.




**8. PERFIL COMPUESTO del antígeno de clase I (de trasplante) del ratón, H-2K$^b$. Por sencillez en la representación se han omitido las partes referentes a hidrofilias negativas. Los números indican las regiones de la secuencia con hidrofilia positiva y reconocimiento bajo que podrían actuar como determinantes.**

## Hidrofilia y reconocimiento

Las zonas inmunodominantes de una proteína se encuentran en su superficie. Por hallarse en contacto con el medio acuoso, cabe inferir una hidrofilia elevada. Si esta suposición fuese correcta, resultaría bastante sencillo identificar dichas regiones; de hecho, se dispone de un método mediante el cual se puede construir el perfil de hidrofilia de cualquier proteína, sin ninguna dificultad, a partir de los factores de hidrofilia de los aminoácidos.

Las predicciones basadas en este método, tal como se ha comprobado luego cuando se han identificado experimentalmente los determinantes antigénicos, son satisfactorias hasta cierto punto. Limitación que era de esperar, pues la estructura espacial de una proteína no queda determinada exclusivamente por razones de hidrofilia: las interacciones entre sus componentes influyen de una manera decisiva.

En nuestro diseño tomamos en consideración las características de hidrofilia y las de reconocimiento, a la hora de identificar los determinantes antigénicos. Y manejamos tres tipos de factores: de hidrofilia, de reconocimiento y de movilidad.

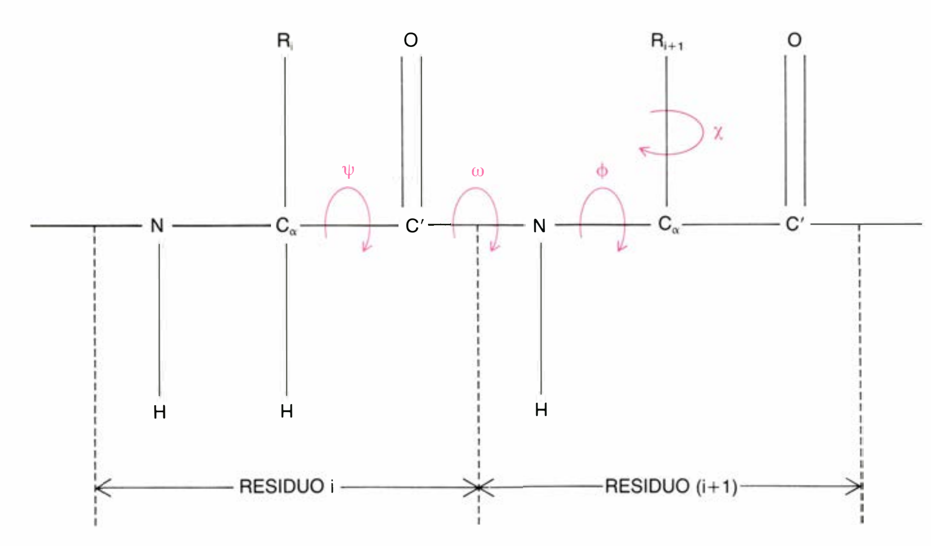
Los factores de hidrofilia ($H$) representan cantidades semiempíricas que reflejan el carácter hidrofílico/hidrófobo de los aminoácidos. En la escala de hidrofilia utilizada, se asignan valores positivos a los residuos hidrofílicos y valores negativos a los hidrófobos, con un valor cero para la glicina. Estos valores son completamente transportables: es decir, siempre se usa el mismo valor para cada residuo, sea cual sea la proteína de la que forma parte.

Los factores de reconocimiento ($R$) fueron obtenidos en cálculos mecanocuánticos. El factor $R$ de cada residuo representa la media de las energías de estabilización de todas las asociaciones bimoleculares de dicho resto con todos los demás. Estos factores son todos positivos, de modo que un valor elevado indica que el residuo interacciona fuertemente con todos los demás (los *reconoce*). Estos factores son también transportables, tal como se ha mencionado para los factores $H$.

Finalmente, los llamados factores atómicos de temperatura o factores de movilidad, obtenidos en estudios cristalográficos, aportan contribuciones de vibraciones térmicas, desorden en el cristal y variabilidad conformacional de las moléculas del mismo. Corrientemente, el factor de movilidad ($M$) asignado a cada residuo representa la media de los factores $M$ de sus átomos pesados; en algunos casos, para simplificar los cálculos, se puede tomar el valor de uno de sus átomos pesados. En general, los residuos aminoacídicos de la superficie de una proteína tienen factores $M$ más elevados que los residuos que se encuentran en su interior. Estos factores $M$, en contraste con los factores $H$ y $R$, no son transportables: es decir, el factor $M$ de un residuo depende de la proteína de la que forma parte, así como de su posición en la secuencia de la misma.

## Construcción de los perfiles

Los perfiles $H$, $R$ y $M$ se construyen, usando los correspondientes factores, mediante un procedimiento que promedia los valores para grupos de seis aminoácidos (que es el tamaño más frecuente de un determinante antigénico). El valor para cada residuo de la proteína se genera de la siguiente manera. En primer lugar, al punto situado entre las posiciones de secuencia $(i-1)$ e $i$ se le da el valor medio de los factores ($H$, $R$ o $M$), correspondiente a los residuos instalados en las posiciones $(i-3)$ hasta $(i+2)$; al punto entre las posiciones $i$ e $(i+1)$ se le da el valor medio de los factores correspondientes a los residuos en las posiciones $(i-2)$ hasta $(i+3)$. Después, para el residuo en la posición $i$ se toma la media de los dos valores anteriores. Repitiendo este procedimiento para todos los aminoácidos de la secuencia (con las modificaciones apropiadas para el principio y el final de la cadena) y representando los valores obtenidos (en ordenadas) como




**9. ANGULOS DE TORSION durante la optimización de una estructura proteínica. Para determinar la estructura espacial de la proteína se necesita conocer las geometrías de los residuos, además de la secuencia del polipéptido. Un programa de simulación construye la cadena polipeptídica empezando desde el extremo amino libre y engarzando luego los residuos aminoacídicos uno a uno. A cada paso, se optimiza la conformación variando los ángulos de torsión phi, psi y ji. Realizada la optimización, se puede intentar una reoptimización de la cadena construida hasta ese momento comenzando desde el primer aminoácido.**

función de la posición en la secuencia (en abscisas), se obtiene el perfil deseado (*H, R* o *M*).

Por no haberse realizado hasta el presente un estudio cristalográfico de ninguna de las moléculas del *CPH* no es posible construir su perfil *M*. Pero como se conocen sus secuencias, no hay ninguna dificultad en obtener sus perfiles *H* y *R*.

Teniendo en cuenta las definiciones de los factores, se descubre inmediatamente que deberían existir ciertas relaciones entre los perfiles *H, R* y *M*. En primer lugar, se predice que las regiones de la proteína caracterizadas por valores positivos en el perfil *H* deberían encontrarse en la superficie de la proteína. Así, en el caso de H-2K$^{b}$, se postularía que las regiones 12-24, 26-79, 87-92, 101-110, 126-131, 143-157, 167-176, 180-187, 191-201, 220-241, 251-256 y 273-279 aparecen en su superficie. (Aunque conviene señalar que la zona 26-79 consta en realidad de dos zonas, 26-56 y 56-79). Por otra parte, las regiones alrededor de las posiciones que ocupan mínimos en el perfil *R* deberían aparecer también en la superficie de la proteína, por estar constituidas por residuos que interaccionan muy poco con otros. Es decir, si estos argumentos son correctos, sería de esperar una correspondencia entre las posiciones de los máximos en el perfil *H* y las posiciones de los mínimos en el perfil *R*.

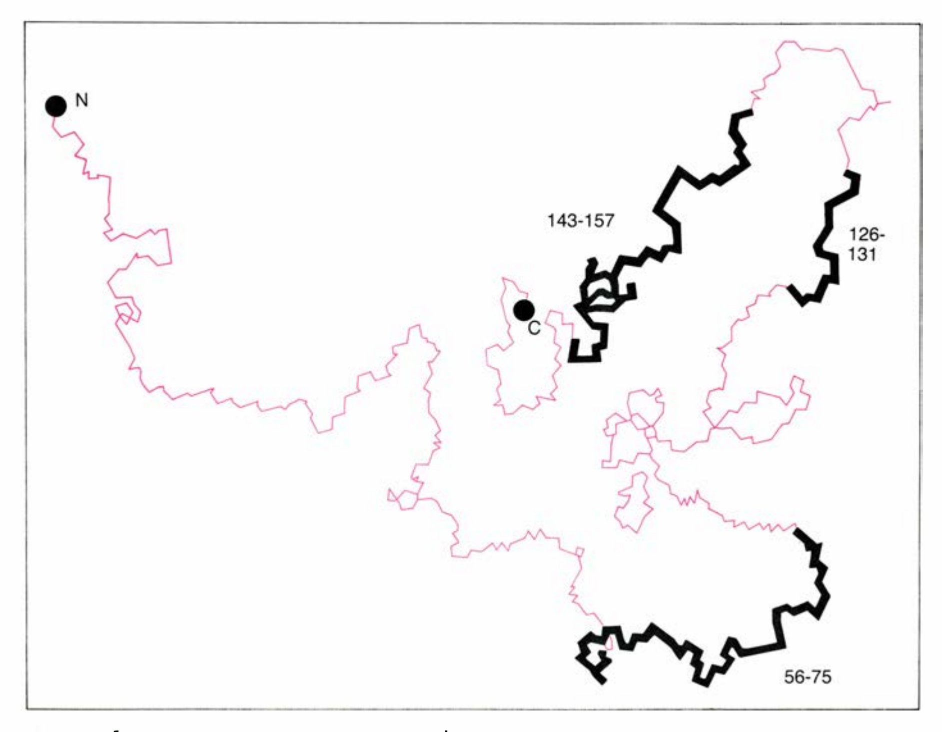
Ya se ha mencionado que los residuos de la superficie de la proteína muestran movilidades mayores que los demás residuos. Por tanto, sería de esperar que las posiciones de los máximos en el perfil *M* correspondiesen a puntos de hidrofilia elevada y reconocimiento bajo. Los resultados obtenidos para inmunoglobulina humana confirman tal correspondencia.

Se infiere de ello que es posible usar dichos perfiles para localizar las regiones que se encuentran en la superficie de la proteína. Como no siempre se dispone de los factores de movilidad, es preciso basar la predicción en los perfiles *H* y *R*, combinados en un perfil compuesto (*C*), construido tomando en cada punto el cociente de los valores de los perfiles *H* y *R*.

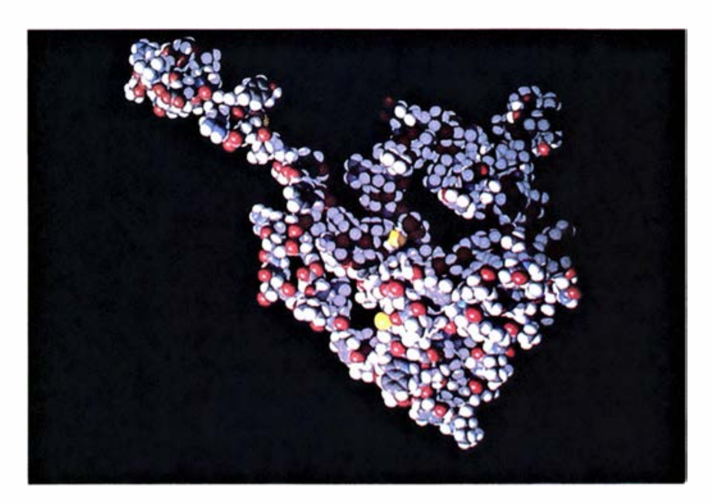
La predicción final se apoya en los cambios observados (para las regiones de hidrofilia positiva) en el perfil *C* con respecto al perfil *H*. Una reducción considerable indica una zona de reconocimiento elevado, que probablemente no aparecerá en la superficie de la proteína y no funcionará como determinante antigénico. Por el contrario, un aumento considerable significa que la región está caracterizada por una hidrofilia positiva y un reconocimiento bajo, siendo de esperar que corresponda a un determinante antigénico.

## Predicción de estructuras proteínicas

Aunque un método de cálculo como éste ofrece grandes esperanzas para la predicción de determinantes antigénicos, hay que confesar que un método basado exclusivamente en el uso de perfiles no permite identificar los determinantes conformacionales (o discontinuos); es preciso, pues, completar la información anterior con la que se




**10. DISEÑO TEORICO DEL ANTIGENO H-2K$^{b}$. Los autores han llevado a cabo la síntesis de la cadena proteínica correspondiente a las dos primeras regiones extracelulares, con 180 residuos. La síntesis se realizó por partes, construyendo y reoptimizando en primer lugar nueve polipéptidos de 20 aminoácidos cada uno. A continuación se fueron empalmando dichos fragmentos, con reoptimización alrededor de los nuevos enlaces formados y, por último, se reoptimizó la proteína entera. El trazo grueso marca los determinantes.**





**11. CADENA PRINCIPAL de la molécula H-2K$^b$ del ratón (*izquierda*). A la derecha se esquematiza la misma; las regiones más vivas de esta última, que aparecen en la superficie de la molécula, corresponden a determinantes antigénicos. Esta estructura teórica representa una conformación estable de la molécula.**

consiga a partir de la estructura espacial de la proteína.

Las dificultades en esta tarea son casi invencibles, debido al gran número de grados de libertad. Se necesitan las geometrías de los residuos, además de la secuencia de la proteína. Un programa de simulación, desarrollado en nuestro laboratorio, construye la cadena polipeptídica empezando desde el extremo *N* (es decir, el extremo con el grupo amino libre), engarzando los residuos aminoacídicos uno a uno. A cada paso, una vez que se ha formado el enlace peptídico (con el oxígeno y el hidrógeno en *trans*), se optimiza (bajo un criterio de energía mínima) la conformación alrededor de dicho enlace, variando los ángulos de torsión $\phi$, $\psi$ y $\chi$. Realizada esta optimización, se puede intentar una reoptimización de la cadena construida hasta ese momento, empezando desde el primer residuo. Se prosigue el proceso hasta añadir el último residuo y acometer entonces una reoptimización, total o parcial, de la proteína construida.

Se trata de un trabajo muy delicado. En primer lugar, ante el elevado número de ángulos que han de optimizarse en una proteína del estilo del antígeno del *CPH*, hay que adelantar que es casi imposible, salvo por azar, llegar a la conformación óptima de la proteína. Aunque se alcance una estabilización de la cadena proteínica durante el proceso de reoptimización, lo más probable es que no se haya conseguido la estructura más estable. Y aun cuando así fuese, no debemos olvidar que el programa de simulación optimiza la conformación de la proteína aislada.

¿Cuáles son, pues, las razones para enfrentarse con este problema? En primer lugar, quizá se puedan identificar, a pesar de todas las limitaciones del método, ciertas propiedades estructurales: por ejemplo, el carácter helicoidal, que confiere rigidez a la cadena proteínica. Se suele postular que las regiones helicoidales son *frías* y conservan su estructura en el baño térmico del organismo, de suerte que pueden ser reconocidas fácilmente por el receptor. Las regiones *calientes*, menos reacias al cambio, pasarán inadvertidas debido a la pequeña probabilidad estadística de que el receptor adopte simultáneamente la conformación complementaria.

Este tipo de información puede servir para confirmar la predicción hecha a partir de los perfiles, viendo si las regiones postuladas como determinantes tienen carácter helicoidal o se encuentran en las inmediaciones de zonas con dicho carácter. La estructura teórica permite contestar, el menos provisionalmente, a otras preguntas: ¿aparecen dichas regiones en la superficie de la proteína? ¿Cuáles son las regiones que se han aproximado entre sí gracias al plegamiento de la cadena proteínica?

## Confirmación experimental

Durante la fase de desarrollo de la metodología, las predicciones teóricas han de recibir confirmación experimental. Dicho trabajo implica la síntesis de polipéptidos con las secuencias de las regiones que podrían actuar como determinantes y la realización de los correspondientes ensayos inmunológicos.

La mayor parte del trabajo experimental se está realizando con ratones. Por esta razón, nuestro diseño teórico se ha centrado sobre el antígeno H-2K$^b$. Se ha llevado a cabo la *síntesis* de la cadena proteínica correspondiente a las dos primeras regiones extracelulares, con 180 residuos. La síntesis se realizó por partes, construyendo y reoptimizando en primer lugar nueve polipéptidos de veinte residuos cada uno. A continuación se fueron empalmando dichos fragmentos, con reoptimización alrededor de los nuevos enlaces formados y, finalmente, se reoptimizó la proteína entera hasta conseguir la estabilización de su estructura. Algunas observaciones son dignas de mención. Por ejemplo, se ha encontrado carácter helicoidal en las regiones 23-31, 44-55, 63-72, 83-90, 96-103, 129-139 y 161-170. Las regiones 56-79, 126-131 y 143-157 aparecen en la superficie de la proteína.

Si comparamos, pues, la predicción a partir de los perfiles con las anteriores observaciones, no queda ninguna duda de que las regiones 56-79, 126-131 y 143-157 constituyen o se hallan adyacentes a determinantes antigénicos. La región 56-79 tiene carácter helicoidal (en la zona 63-72) y se halla en la superficie; y las regiones 126-131 y 143-157 solapan o se hallan adyacentes a una zona helicoidal (129-139) y, además, se encuentran en la superficie de la proteína.

Se puede añadir un ulterior comentario a los efectos de las substituciones mencionadas más arriba. Así, por ejemplo, se ha indicado que los residuos 77, 89, 121, 152, 155 y 156 (además de los residuos 22, 23, 24, 116 y 165) tienen un efecto sobre los determinantes. En primer lugar, los residuos 77 y 152, 155 y 156 forman parte de dos de los determinantes que se predicen teóricamente. Por otro lado, un estudio de las separaciones entre residuos en la estructura espacial pone de manifiesto que los residuos 49 y 87, 123 y 145 y 130 y 144 se encuentran a distancias inferiores (entre sus centros de masa) a

7,5 angstrom. De lo que cabe inferir que la interacción entre los residuos 49 y 87 pudiera ser la responsable de la formación del bucle en la primera zona extracelular, que proyecta a la región 56-79 hacia el exterior. En otro orden, el hecho de que los residuos 123 y 145 y 130 y 144 se hallen próximos sugiere que las zonas 126-131 y 143-157 podrían constituir juntas un determinante conformacional. Destaquemos, asimismo, que los residuos 96 y 169 también se encuentran próximos, con una posible estabilización del bucle en la segunda zona extracelular, que en la realidad se halla estabilizada por un puente de disulfuro entre las cisteínas en posiciones 101 y 164.

## Una perspectiva de futuro

Todos los datos parecen conducir, pues, a la misma conclusión. La información teórica y los resultados experimentales con el polipéptido sintético 61-69 y sobre mutaciones confirman que las regiones 56-79, 126-131 y 143-157 son los principales determinantes reconocidos en el antígeno de clase I, H-2K$^{b}$.

0Qué tienen que ver estos resultados con la prevención del rechazo de trasplantes? Sea un ratón al que se le trasplantará un órgano de un ratón de la misma estirpe. Analicemos los dos posibles caminos a seguir. Por un lado, se podrían utilizar polipéptidos sintéticos (solubles), que simulen las regiones inmunodominantes del antígeno de trasplante del donante, para inducir en el paciente una pseudotolerancia hacia el trasplante. La razón en que se apoya este procedimiento estriba en que la presencia de dichos péptidos, inyectados en cantidades suficientes, podría alejar la respuesta inmune del trasplante que presenta los mismos determinantes. El tratamiento ha de iniciarse antes de la operación, continuándolo hasta que el trasplante haya sido aceptado, pero existe el inconveniente de que pueda ser necesario mantenerlo de una forma permanente.

La otra vía alternativa, más adecuada, consiste en inyectar al paciente, antes de realizar el trasplante, anticuerpos preparados contra los polipéptidos sintéticos mencionados arriba. Este tratamiento podría inducir la aparición de células *T* supresoras o anticuerpos anti-idiotípicos, que protegerían al trasplante. En vista de los avances que se están realizando en este campo, resulta bastante razonable predecir que estos tratamientos podrían aplicarse ya en un futuro cercano.

# Preparando el encuentro del *Voyager 2* con Urano

*Difíciles problemas planteados por las enormes distancias, bajos niveles de luz, envejecimiento del equipo y fallos mecánicos se resolvieron mediante control por radio desde el suelo mientras el* Voyager 2 *cruzaba el espacio hacia Urano*

Richard P. Laeser, William I. McLaughlin y Donna M. Wolff

El día 24 de enero del año pasado, el vehículo espacial *Voyager 2* sobrevoló las nubes de Urano a sólo 81.000 kilómetros de altura. Desde esa insólita atalaya, el vehículo transmitió espectaculares imágenes del planeta, satélites y anillos a través de los tres mil millones de kilómetros que lo separaban de la Tierra. Además de obtener sorprendentes imágenes ópticas, el equipo científico que transportaba recogió un buen número de valiosos datos sobre el sistema uraniano, datos suficientes para mantener ocupados a los expertos planetarios durante los próximos años. Lo que posibilitó tan notable éxito fue algo más que decisión y buena suerte. El ingrediente adicional correspondió a su eficaz ingeniería en vuelo: la vigilancia, control y modificación del vehículo durante el curso de su viaje por el espacio.

La propia determinación de enviar el *Voyager 2* a Urano se tomó tres años y medio después de su lanzamiento en 1977. El *Voyager 2*, como su gemelo el *Voyager 1*, se habían proyectado para explorar solamente Júpiter y Saturno. Para enero de 1981, cuando se decidió añadir Urano al itinerario del *Voyager 2*, los dos vehículos espaciales habían cumplido la totalidad de los objetivos de la misión combinada. El *Voyager 1* había pasado junto a Júpiter y Saturno, enviando un gran volumen de información sobre los dos planetas, incluida la prueba de la existencia de volcanes activos en Io, uno de los satélites jovianos. El *Voyager 2* (lanzado antes que el primero) había llegado a su punto de máxima aproximación a Júpiter y estaba en camino de su ulterior exploración del sistema saturniano.

Sin embargo, el grupo responsable del proyecto Voyager tenía una poderosa razón para ampliar la misión: la alineación de los planetas exteriores permitiría que el *Voyager 2* tomase la dirección de Urano y Neptuno, arrojado por la fuerza gravitatoria de Saturno. (Tal "honda" gravitatoria había sido ya aprovechada para enviar a los *Voyager* de Júpiter a Saturno.) La última vez que los planetas exteriores estuvieron alineados de manera similar fue durante la presidencia de Thomas Jefferson, hace unos 180 años. Semejante oportunidad contrapesaba, de largo, otro hecho: la probabilidad de que el *Voyager 2* durase otros cinco años se estimaba entre el 60 y el 70 por ciento, muy por debajo del criterio usual por el que se rige la Administración Nacional de Aeronáutica y del Espacio (NASA) para aprobar tales misiones. Y así fue como se tomó la decisión de encaminarse hacia Urano.

Cuando pasó por la vecindad de Saturno, el *Voyager 2* estaba a 1500 millones de kilómetros de la Tierra y llevaba ya cuatro años en el espacio. Cuando llegó a Urano, doblaba la distancia y tiempo de vuelo. Y aunque parezca paradójico, había mejorado: la mayor parte de los subsistemas del vehículo espacial habían sido perfeccionados en ruta. Los ingenieros del proyecto habían logrado esto, pese a las dificultades impuestas por las grandes distancias, la edad del vehículo espacial, los bajos niveles de luz y un sistema de suministro de energía agonizante. El resultado de sus esfuerzos fue un encuentro con Urano rozando la perfección y la esperanza de un encuentro con Neptuno en 1989.

Las sondas Voyager están muy lejos de los estilizados vehículos espaciales que nos ofrecen el cine y la televisión. La característica dominante del Voyager es el gran disco parabólico que sirve de antena, de 3,7 metros de diámetro, mediante la cual transmite las señales de radio a la Tierra y las recibe desde ésta. En direcciones aproximadamente opuestas desde la base del disco se extienden dos armazones. Uno de ellos soporta tres generadores termoeléctricos de radioisótopos y el otro sostiene una plataforma donde se aloja un conjunto de instrumentos científicos, entre ellos el sistema de imágenes. Entre un armazón y otro hay un par más de desgarbadas extremidades: un botalón que contiene un magnetómetro para campo de baja y alta intensidad y dos antenas de cable para observaciones radioastronómicas y de ondas del plasma.

Los tres generadores del vehículo producen electricidad a partir del calor liberado por la desintegración radiactiva de óxido de plutonio, que recibe un material termoeléctrico. Este convierte directamente el calor en electricidad. El rendimiento de los generadores es bajo (alrededor del 5 por ciento); su gran ventaja estriba en que pueden funcionar en las oscuras regiones exteriores del sistema solar, donde las células fotovoltaicas (que convierten directamente la luz en electricidad) serían ineficaces.

Junto con las dos cámaras del sistema de imágenes, otros tres dispositivos se alojan en la plataforma del lado opuesto a los generadores: un fotopolarímetro, instrumento que mide la intensidad y ángulo de polarización de la luz, y dos espectrómetros, que registran las longitudes de onda componentes de la radiación electromagnética. Uno de los espectrómetros opera en la región infrarroja del espectro y el otro en la ultravioleta. La plataforma es susceptible de explorar en dos direcciones mediante engranajes adecuados: en azimut (de un lado a otro) y en elevación (hacia arriba y hacia abajo). También hay un grupo de detectores de partículas elementales acoplado al ar-

mazón de la plataforma de exploración. Todo este equipo, además de los magnetómetros y las antenas de cable, facultan al vehículo espacial Voyager para realizar 10 experimentos científicos diferentes. El sistema de radio del vehículo, su enlace vital con la Tierra, es al mismo tiempo el medio por el cual se puede realizar un undécimo experimento de radio.

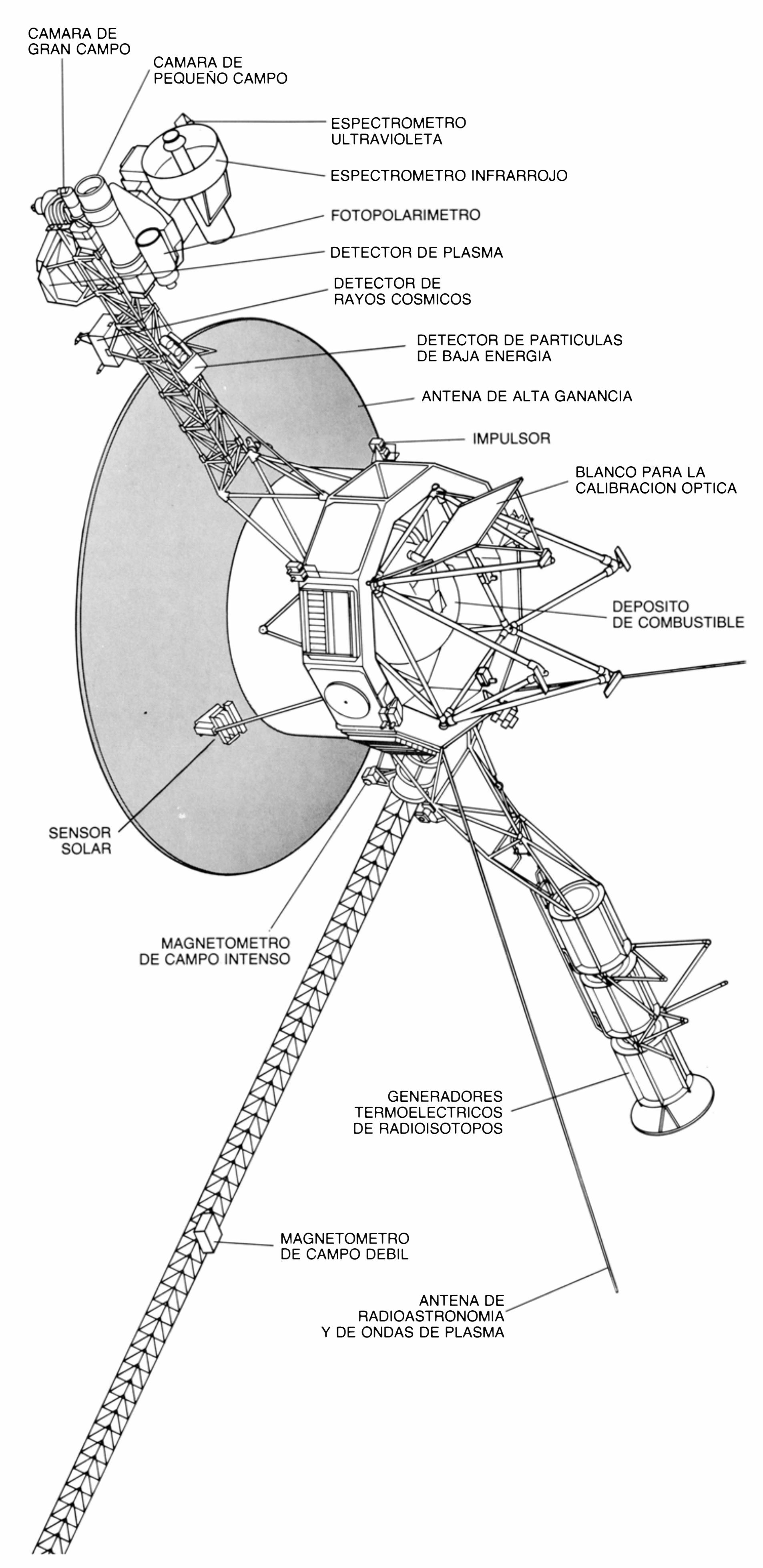
El equipo de tratamiento de datos más importante a bordo del Voyager es el subsistema de datos en vuelo (FDS, de *F*light *D*ata *S*ubsystem). Consta de dos ordenadores, uno complementario del otro. Estos ordenadores, entre otras cosas, controlan el estado de los instrumentos científicos y traducen los datos obtenidos por ellos al formato correcto para su transmisión a la Tierra.

La navegación y orientación del vehículo espacial se controla mediante dos sistemas de impulsores. Estos expelen los gases producidos en una reacción catalizada de la hidrazina, compuesto de hidrógeno y nitrógeno que se almacena en forma líquida en un tanque. La provisión de hidrazina a bordo es crítica, ya que con ella se alimentan los impulsores de control de posición que mantienen apuntada hacia la Tierra la antena parabólica, altamente direccional. Los vehículos espaciales Voyager se comportan como proyectiles en vuelo libre; su velocidad y dirección quedan afectadas por las interacciones gravitatorias con los cuerpos del sistema solar, por las cada vez más pequeñas fuerzas que ejercen los fotones emitidos por el Sol y por la propia fuente de energía del vehículo espacial, ejercida por los impulsores. Una cuidadosa dosificación de la hidrazina dejó el depósito del *Voyager 2* medio lleno tras su encuentro con Urano.

La hidrazina es uno más de los componentes que inevitablemente se van gastando en el curso de la misión. Otros son el radioisótopo, cuya desintegración alimenta los generadores termoeléctricos, y en general varios componentes que están sometidos al desgaste por el uso. La única manera de minimizar la pérdida de esos recursos, y con ello alargar la vida eficaz del ve-



**1. ESTA MAQUETA DEL VOYAGER, junto con duplicados de los diversos subsistemas del vehículo espacial, se emplea en el Laboratorio de Propulsión a Chorro de la NASA para someter a prueba los nuevos métodos que se podrían ensayar en el *Voyager 2* en su viaje hacia Neptuno, tras su triunfal encuentro con el planeta Urano en el mes de enero de 1986. La maqueta difiere del vehículo real en que el botalón para los magnetómetros no está desplegado.**




hículo espacial, es emplearlos lo menos posible.

La fuente de energía eléctrica constituyó un problema más serio que la provisión de combustible durante el encuentro con Urano. Cuando se lanzó el *Voyager 2*, los generadores termoeléctricos proporcionaban una potencia de salida de más de 470 watt. Por la fecha en que el vehículo espacial alcanzó Urano, la desintegración natural del óxido de plutonio había reducido la potencia disponible a unos 400 watt, cifra insuficiente para alimentar todos los sistemas del vehículo espacial simultáneamente. En consecuencia, algunos subsistemas tenían que conectarse después de que otros se hubieran desconectado, lo que imponía ciertas limitaciones en el proyecto de la misión.

Cuando el vehículo espacial rodeó Urano, por ejemplo, quedó eclipsado por los anillos del planeta y por el planeta mismo (suceso que recibe el nombre de ocultación). Se esperaba poder recoger información sobre la temperatura y composición de la atmósfera del planeta y sobre el tamaño de los objetos que forman los anillos observando la manera en que las señales de radio emitidas hacia la Tierra desde el vehículo espacial eran afectadas al atravesar los anillos y la atmósfera durante el pasó del *Voyager 2* por detrás de Urano. Para este experimento, los investigadores del proyecto planeaban conectar uno de los transmisores del vehículo espacial a alta potencia, lo que añadía 53 watt a la potencia eléctrica requerida.

Durante ese tiempo, los investigadores pensaban también tomar imágenes de la cara oscura del planeta y de sus anillos iluminados desde atrás. Estas actividades implicaban apuntar las cámaras moviendo las plataformas de exploración y registrar las imágenes en cinta. Ambas actividades consumirían potencia adicional. Si por alguna razón los subsistemas del vehículo intentasen emplear más potencia que la disponible, un sistema de protección contra sobrecargas desconectaría automáticamente varios subsistemas. Tal suceso en medio de la ocultación habría interrumpido las observaciones científicas

**2. VARIOS INSTRUMENTOS CIENTIFICOS de control remoto del *Voyager 2* permiten llevar a cabo hasta once experimentos. El vehículo espacial está también equipado con una fuente de suministro de corriente eléctrica, sistema de comunicaciones y ordenadores para el tratamiento de datos. Dos grupos de impulsores sirven para controlar la orientación del vehículo espacial, así como su trayectoria.**

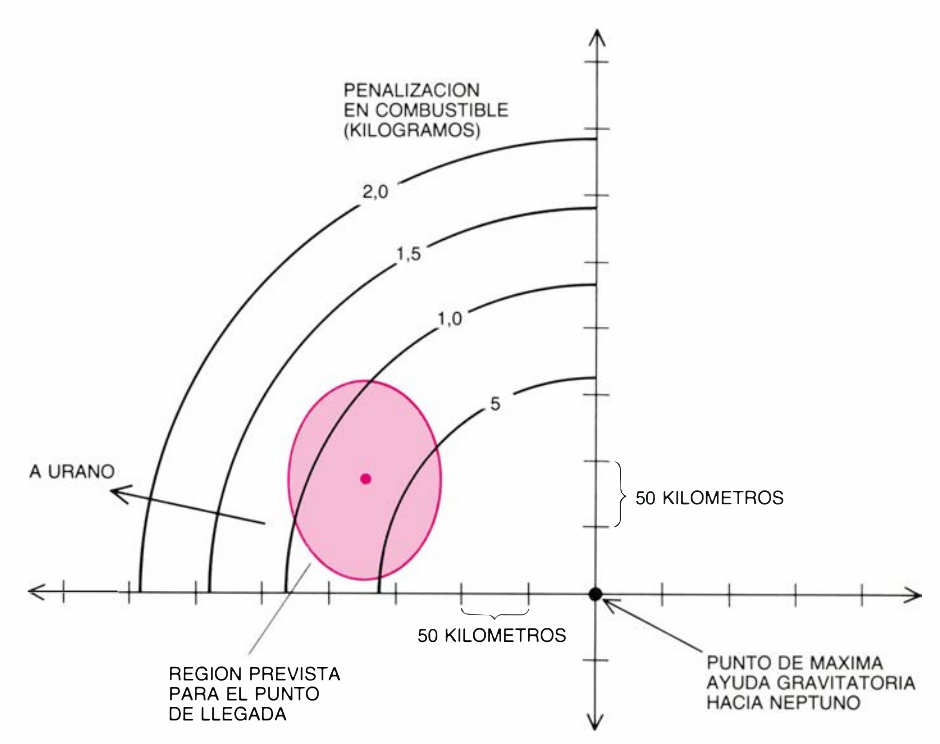
hasta que se hubieran podido enviar al vehículo, desde la Tierra, órdenes de volver a conectar.

De aquí que se hubiera de realizar un delicado encaje de bolillos —conectar y desconectar subsistemas y calentadores— a fin de asegurar la potencia adecuada durante todo el tiempo del experimento de ocultación. La obra entrañaba graves riesgos: requería operar en el vehículo espacial cerca del límite de 400 watt. Para reducir el riesgo, se llevó a cabo una serie de pruebas en las que se hizo funcionar al vehículo *Voyager 2* cerca del límite de potencia disponible antes de la ocultación. Los resultados sugerían que el método podía dar resultado.

Otro importante recurso escaso cerca de Urano era la luz. Aunque Urano está a doble distancia del Sol que Saturno, el nivel de luz en Urano es sólo una cuarta parte del que ofrece Saturno. Esto significa un tiempo de exposición para las cámara cuatro veces superior, lo que a su vez aumentaba el riesgo de imágenes borrosas por bamboleo no intencionado del vehículo mientras los obturadores estaban abiertos.

El problema se resolvió mediante dos cambios de ingeniería destinados a estabilizar el vehículo espacial como plataforma de observación. El primer cambio salía al paso del momento cinético no deseado e impartido al vehículo espacial cada vez que la grabadora magnética se conectaba en el modo de alta velocidad, empleado para almacenar imágenes digitalizadas y otros datos. Para anular ese momento, se modificó la lógica cifrada en los ordenadores de control de posición a bordo, de suerte que encendiera brevemente los impulsores apropiados cada vez que se conectaba o desconectaba el modo de alta velocidad de la grabadora.

El segundo cambio requería unas correcciones mediante el uso del subsistema de control de posición todavía más delicadas. Dos sensores celestes, uno apuntando al Sol y otro a una estrella de referencia, proporcionan la información sobre la orientación del vehículo en cada momento. Cuando el vehículo deriva demasiado de la orientación deseada, se enciende brevemente el impulsor adecuado de cabeceo, balanceo o guiñada, que devuelven el vehículo a la posición correcta. La deriva, como la causada por los pares de fuerzas residuales de la grabadora magnética o por pares externos debidos a la presión de los fotones solares, se controla dentro de una precisión de 0,05




**3. CONSUMO DE COMBUSTIBLE DEL *VOYAGER 2*: se reduce al máximo aprovechando la atracción gravitatoria de los grandes cuerpos del sistema solar para desviar el vehículo hacia sus objetivos. La penalización (*cuadrantes*) por no haber alcanzado el punto donde más habría ayudado la gravedad de Urano en el viaje hacia Neptuno se estimó, cinco días antes del punto de máxima proximidad, entre medio y un kilogramo de combustible. El grupo del proyecto prefirió no realizar ninguna maniobra de corrección de la trayectoria porque el precio a pagar no era muy alto (quedaban 62 kilogramos de combustible en el depósito), el seguimiento del vehículo se habría hecho más difícil y el corto número de integrantes del grupo podría dedicarse a otros trabajos. El plano coordenado se traza pasando por el centro de Urano, a unos 100.000 kilómetros en la dirección indicada, y es casi perpendicular a la dirección de vuelo del *Voyager 2* cuando éste se acercaba al planeta. El combustible transportado es hidrazina, un compuesto de hidrógeno y nitrógeno. Almacenado en forma líquida, se convierte en gas antes de ser expelido a través de los impulsores.**

grados según los tres ejes de rotación durante los períodos de encuentros planetarios. Este intervalo de máxima deriva permisible se llama banda muerta.

Obviamente, las imágenes saldrían menos borrosas si se pudiera aminorar las velocidades de deriva dentro de la banda muerta. El grupo de ingeniería del Voyager analizó la lógica del control y halló una manera de reprogramar el ordenador de control de posición para acortar la duración del intervalo que permanecen encendidos los impulsores cada vez que el vehículo espacial alcanza el límite de la banda muerta. Resultado de ello, podíase reducir la fuerza de los impulsores y los cambios en la orientación del vehículo espacial serían más suaves.

Aunque sencillo en principio, este método planteó dificultades de orden práctico. Se hicieron pruebas en la Tierra con impulsores idénticos a los del vehículo para determinar hasta dónde se podían reducir los niveles de impulso y mantener todavía una firme orientación del aparato. Parecía factible reducir el impulso a la mitad. Otras pruebas adicionales en tierra confirmaron que con los impulsos reducidos no se acortaría la esperanza de vida de los sistemas de impulsión.

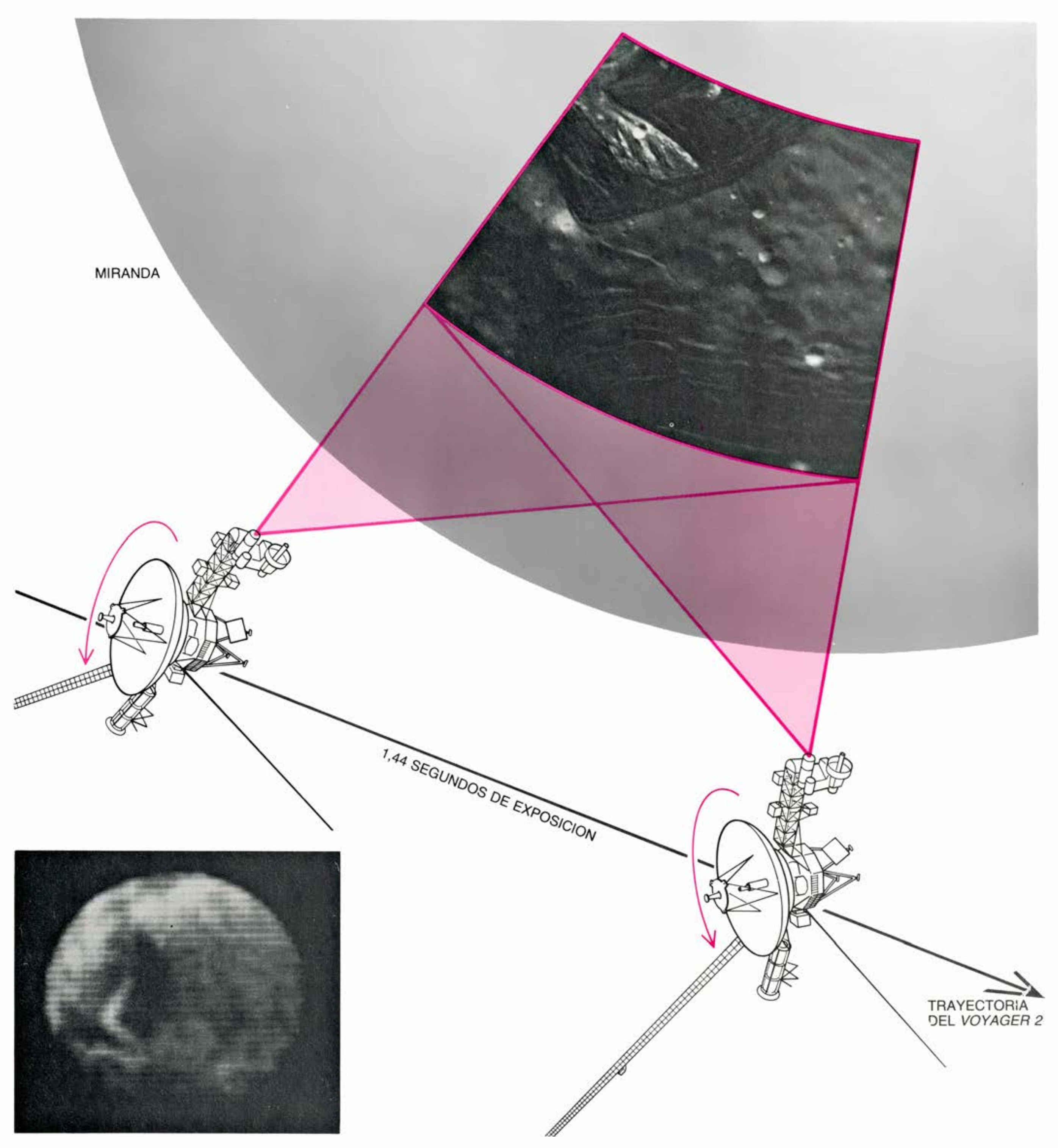
Después de comprobar en el laboratorio la lógica del algoritmo de control con un simulador, el paso siguiente era reducir poco a poco la intensidad de impulsos en el *Voyager 1* observando los resultados en cada paso. Aunque el *Voyager 1* no tiene programados más encuentros planetarios en su itinerario, los experimentos científicos desarrollados a bordo siguen proporcionando datos valiosos. Además, mantiene su carácter de óptima herramienta ingenieril o banco de pruebas para nuevos cometidos asignados al *Voyager 2*. Como el método funcionó en el *Voyager 1*, se aplicó al *Voyager 2*.

Aunque los dos métodos de estabilización ayudaron a hacer más nítidas las imágenes obtenidas de Urano, se había proyectado que el *Voyager 2* se aproximase tanto a los cinco satélites conocidos del planeta, que en este caso había que considerar otra fuente de emborronamiento de las imágenes: el movimiento relativo del vehículo espacial respecto a los satélites. Tal situación es familiar para cualquier fotógrafo aficionado que haya tomado fotografías desde un vehículo en

movimiento: los objetos de los primeros planos aparecen borrosos, aunque los del fondo se vean nítidos.

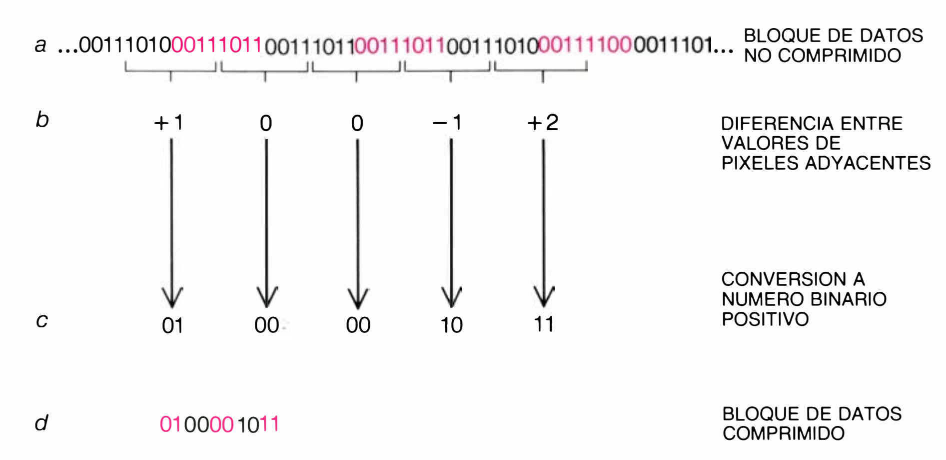
La estrategia en el caso del *Voyager 2* fue muy parecida a la que emplean los fotógrafos expertos: mover la cámara con el obturador abierto de manera que el objeto de interés quede en una posición fija dentro del campo de visión del objetivo.

Este tipo de movimiento de compensación se obtuvo, en el caso del *Voyager 2,* activando los impulsores de control de posición para provocar el giro del vehículo entero con la velocidad angular adecuada mientras se estaban tomando imágenes. Si un movimiento de compensación así lo hubiera ejecutado solamente la plataforma de exploración, donde están fijadas las cámaras,




**4. IMAGENES DE ALTA RESOLUCIÓN DE MIRANDA, uno de los satélites de Urano. Se encuentran entre las mejores imágenes jamás obtenidas en el curso de una misión planetaria. A causa de los bajos niveles de iluminación en Urano, se precisaban largos tiempos de exposición para las diversas imágenes tomadas durante el viaje. A fin de evitar imágenes borrosas, se modificó la lógica del ordenador que pone en funcionamiento el encendido de los impulsores de control de posición para minimizar las sacudidas de las cámaras mientras el obturador estaba abierto. En el caso de Miranda, lo más importante fue la precisión en el encendido de los impulsores para hacer girar todo el vehículo espacial suavemente, de suerte que compensara el movimiento relativo del vehículo y su objetivo. Durante las exposiciones, el *Voyager 2* viajaba a 72.000 kilómetros por hora pasando a 29.000 kilómetros de Miranda. La calidad de las imágenes que se obtuvieron permitía resolver accidentes superficiales de hasta medio kilómetro. Si el vehículo espacial no hubiera sido cuidadosamente gobernado, colocado en posición y girado con cabal exactitud, la resolución de las imágenes hubiera sido de unos 26 kilómetros, comparable con la de la fotografía más pequeña de Miranda, a la izquierda, y se habrían perdido muchas características topográficas del satélite. (El esquema gráfico del centro es de Hank Iken.)**

habríanse producido sacudidas. Las necesarias velocidades de giro en torno a los tres ejes se obtuvieron "engañando" al subsistema de control de posición: se enviaba al vehículo espacial un mensaje que ordenaba a la lógica del control de posición compensar una deriva ficticia en la señal de referencia de la posición. De este proceso dedujíase un inconveniente: la antena del vehículo espacial no apuntaría a la Tierra. La pérdida temporal de radiocomunicación se consideró más que compensada por el valor de las imágenes de alta resolución adquiridas.




**5. COMPRESION DE LOS DATOS DE IMAGENES, aplicada durante el encuentro con Urano para reducir el número de bits a transmitir a las estaciones terrestres. Cada línea de una imagen consta de una fila de 800 pixeles, o elementos de imagen. El brillo de cada pixel se expresa en forma de un número binario de ocho bits. En vez de transmitir a la Tierra el valor del brillo de cada pixel, como se hizo en los encuentros anteriores con Saturno y Júpiter, sólo se transmitió la diferencia entre niveles de brillo de pixeles adyacentes. Se ilustra una versión simplificada de la técnica. Los 800 pixeles de cada fila se dividen en 160 grupos de cinco pixeles cada uno (*a*). Las diferencias de brillo entre el primer pixel de cada grupo y el último del precedente, así como entre pixeles adyacentes del mismo grupo, se calculan y anotan (*b*). Las diferencias se convierten en números binarios positivos (*c*). (En este ejemplo bastan números de dos dígitos.) El bloque de datos comprimido que se transme a la Tierra consta de los dos números de cinco dígitos encadenados. Aquí, unos datos que hubieran requerido 40 bits para ser expresados se han comprimido en un bloque de 10 bits.**

Al igual que ocurría con el nivel de luz, la tasa de bits que puede mantenerse, esto es, la cantidad de información codificada digitalmente que se puede recibir de forma fidedigna en un tiempo dado, es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia del vehículo a la Tierra. En contraste, la cantidad de datos que los científicos desean obtener tiende a crecer con la distancia. En el caso del *Voyager 2* el dilema se resolvió modificando los programas de procesamiento de datos con que operaban los ordenadores instalados a bordo y aumentando la capacidad de las estaciones receptoras en tierra.

En el *Voyager 2*, las listas de datos se codifican antes de la transmisión, de modo que se puedan detectar y corregir los errores en la Tierra. Un ejemplo sencillo de un sistema de codificación así es aquel en que a cada bit, o dígito, de un número binario (1 o 0) se le añade un par de repeticiones del bit. Dicho de otra manera, si el bit del dato fuese 1, se transmitiría 111. Análogamente, se transmitiría 000 para cada bit 0 del dato.

El hecho de que el vehículo espacial transmita 111 no garantiza que la estación terrestre reciba 111. A causa del inevitable ruido de fondo en el procesado y recepción de la radioseñal, algunas veces el 1 se registrará como 0 o al revés. Por tanto, los números binarios de tres dígitos se pueden recibir como ocho combinaciones posibles de unos y ceros. A pesar de todo, si se aplica, al decodificar, la regla de que "la mayoría gana", y suponiendo que el bit correspondiente al dato es el valor del dígito que se ha repetido al menos una vez en el triplete transmitido, entonces la probabilidad conjunta de que el bit del dato se interprete erróneamente es notablemente inferior a lo que sería si se hubiera transmitido sin cifrado y descifrado.

Aunque se trata de un ejemplo sencillo, da una idea de los artificios empleados en la aplicación de códigos o cifrados para la detección y corrección de errores: se puede aumentar la garantía de la recepción de datos, pero a costa de incrementar el número total de bits transmitidos. Para el *Voyager 2*, sin embargo, cualquier aumento en el número total de bits a transmitir aminora el ritmo al que pueden remitirse los datos científicos.

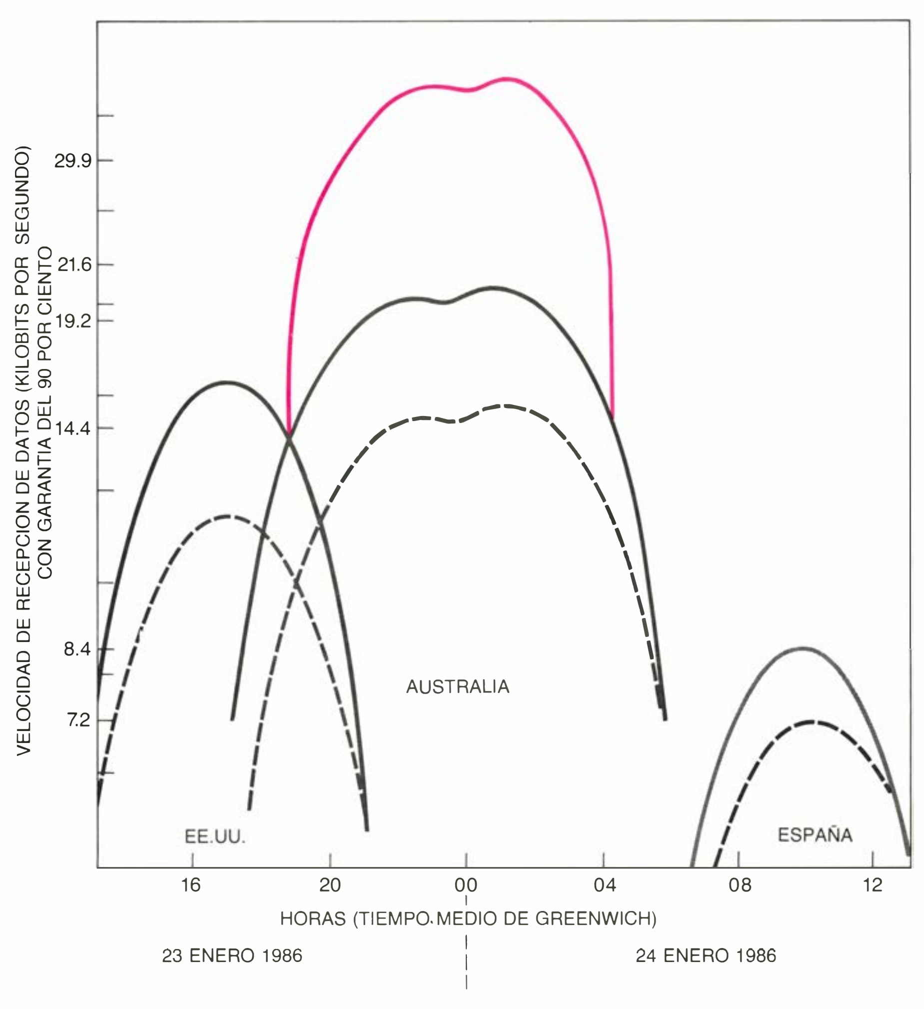
En el ejemplo antes citado, los dos bits codificados constituyen lo que se llama el bloque del código; el bit de datos integra el bloque de datos. El bloque del código dobla, en tamaño, el bloque de datos, lo que triplica el trabajo de transmisión. Los esquemas de codificación usados en el Voyager son, evidentemente, mucho más complicados que en el ejemplo, y el número total de bits transmitidos no es, afortunadamente, tan grande. Durante los encuentros con Júpiter y Saturno, el esquema particular de codificación que se empleó, llamado clave Golay, daba por resultado bloques de código de igual tamaño que los bloques de datos. En Urano se empleó otro esquema de codificación (clave Reed-Solomon), con el que el tamaño del bloque de codificación se reducía a una séptima parte del bloque de datos. La decisión de pasar a la codificación Reed-Solomon en Urano comportaba cierto riesgo. El equipo de a bordo encargado de acometerlo carecía de duplicado de seguridad, mientras que el de Golay sí lo tenía.

Importa señalar que el equipo para el Reed-Solomon se había instalado en el vehículo espacial con una finalidad distinta. El Voyager constituía la primera misión espacial que dependía de una radiofrecuencia de 8,4 gigahertz (en la llamada banda *X*) para el envío de datos. Se temía que este nuevo canal no funcionase satisfactoriamente, y el sistema Reed-Solomon habría sido entonces de gran ayuda en la banda *S* (2,3 gigahertz), menos capaz, en la que transmite también datos el Voyager.

Otra medida que todavía reducía más el número de bits que habían de transmitirse a la Tierra desde Urano era la "compresión" de los datos de imagen. Las cámaras del *Voyager 2* descomponen la imagen en el campo de visión en un conjunto de pixeles, o elementos de imagen, algo semejante a las fotografías de los periódicos, que están formadas por puntitos. El vehículo espacial transmite a la Tierra un número binario que corresponde al nivel de brillo de cada pixel.

Una imagen de las que envía el Voyager consta de 800 filas de pixeles, cada una de las cuales posee 800 pixeles, lo que da un total de 640.000 pixeles. Cada uno de éstos puede tomar uno de los 256 niveles de brillo definidos, que van desde el negro hasta el blanco. Para expresar tal intervalo de niveles de brillo (un total de 28 niveles) en sistema binario, harían falta 8 bits. De aquí que la transmisión de una imagen requiera 5.120.000 bits (800 × 800 × 8) sin contar los que se añaden para detectar y corregir los errores.

El número de bits necesario para expresar tal imagen se puede reducir a menos de la mitad aprovechando que los pixeles adyacentes suelen presentar niveles de brillo próximos entre sí. Esto




**6. LA CAPACIDAD DE COMUNICACION se incrementó durante el encuentro del *Voyager 2* con Urano, combinando electrónicamente las señales recibidas por un conjunto de antenas. La capacidad de comunicación se mide por medio de la probabilidad de que determinada velocidad de llegada de datos se pueda recibir relativamente libre de error. Aquí se muestran curvas que representan el 90 por ciento de probabilidad de recibir datos del *Voyager 2* cuando se acercaba al punto de máxima proximidad con Urano. Existían varias combinaciones de antenas disponibles en los complejos de la Red del Espacio Profundo, de la Administración Nacional de Aeronáutica y del Espacio, en los Estados Unidos, Australia y España: una antena parabólica única de 64 metros (*curvas de trazos*); una antena de 64 metros combinada con otra de 34 metros (*curva en gris*) y una antena de 64 metros combinada con dos de 34 (*curvas en negro*). Asociando el radiotelescopio Parkes de 64 metros (*curva en color*) se podían recibir con bastante seguridad hasta 29,9 kilobits por segundo. La mejor recepción se logró en Australia porque Urano estaba entonces en el hemisferio Sur.**

es particularmente cierto para los pixeles que no se encuentren a uno y otro lado de los bordes que delinean un objeto. Si se pudiera hacer que el *Voyager 2* transmitiera sólo los cambios en los valores de brillo de pixel a pixel, en vez del valor absoluto de brillo de cada pixel, bastaría en promedio con tres bits por pixel en lugar de ocho. (Evidentemente, el valor absoluto del brillo del primer pixel de cada fila se debe transmitir como punto de partida.)

Esto fue precisamente lo que se hizo. Se sacrificó la función de reserva del segundo ordenador FDS, de suerte que el dispositivo pudiera reprogramarse con algoritmos de compresión de datos. Sin embargo, el tratamiento de compresión de imagen es más vulnerable a los errores, ya que el valor del brillo de cada pixel (excepto el primero) depende del anterior. De aquí que un error en un bit podría afectar a la totalidad de una fila de la imagen comprimida, en vez de alterar un pixel único de la no comprimida. Ambos modos de transmisión de imágenes, el comprimido y el no comprimido, se aplicaron a las casi 6000 imágenes obtenidas del sistema de Urano.

No todas las medidas tomadas para favorecer la garantía del envío de datos se referían al vehículo espacial. La capacidad de recogida de bits de las estaciones terrestres se mejoró combinando electrónicamente las señales recibidas por varias antenas en la Tierra, procedimiento llamado de agrupación. En este sentido, la antena de 64 metros de diámetro y las dos de 34 metros del complejo de la NASA de seguimiento instalado en Australia, perteneciente a la Red de Trabajo del Espacio Profundo, se combinaron entre sí y luego con el radiotelescopio Parkes de 64 metros, cedido por los radioastrónomos australianos. La velocidad de recepción fidedigna de datos aumentó de 14,4 kilobits por segundo para una antena única de 64 metros hasta 29,9 kilobits por segundo para la agrupación. En la práctica, la velocidad más alta de recepción de datos para Urano se mantuvo en 21,6 kilobits por segundo; la de 29,9 kilobits por segundo se reservó para situaciones de emergencia.

Otra actividad importante desarrollada en tierra se refería al gobierno del vehículo espacial. Para realizar los cálculos de la trayectoria hubo que acudir a grandes ordenadores, que operaban con complicados modelos de mecánica celeste y técnicas estadísticas. Ello no obstante, la navegación interplanetaria continúa siendo mitad ciencia y mitad arte. Para obtener respuestas razonables, se requiere cierta dosis de intuición y tino.

Las entradas suministradas al proceso de navegación se pueden clasificar en dos grupos básicos: radiométricas y ópticas. Los datos radiométricos se basan en la interacción del sistema de radio del vehículo espacial con antenas basadas en el suelo de tres maneras diferentes: el corrimiento Doppler de las señales de radio (o variación de la radiofrecuencia debida al movimiento relativo del transmisor y receptor), el tiempo de ida y vuelta de la señal y el ángulo entre el haz de radio del vehículo espacial y una radiofuente de referencia en el cielo. Estas tres medidas proporcionan información, respectivamente, sobre la componente de la velocidad del vehículo espacial a lo largo de la visual, su distancia y su posición angular en la esfera celeste.

Los datos ópticos son recogidos por las dos cámaras en el vehículo espacial Voyager. La navegación óptica, que se ensayó por primera vez en las sondas Mariner y Viking que se dirigían a Marte, era de hecho indispensable en la misión Voyager. A diferencia de los datos radiométricos, los datos ópticos permiten determinar la posición del vehículo espacial en relación con objetos de interés —Urano y sus satélites en el caso del *Voyager 2*—, en vez de hacerlo con relación a la Tierra. El método óptico permite determinar las órbitas de los satélites naturales, que no tienen receptores de radio, así como la órbita del vehículo espacial. Esto adquiere especial importancia cuando se intenta apuntar los instrumentos hacia un satélite próximo, en particular si su masa y órbita no se conocen con precisión.

Tanto los datos radiométricos como los ópticos se procesaron para fijar la posición del *Voyager 2* con un margen

de error de 23 kilómetros cuando se encontraba a una distancia de más de tres mil millones de kilómetros. Tal precisión era, en realidad, mayor que la requerida para apuntar exactamente las cámaras durante el paso por las cercanías de Miranda, uno de los satélites de Urano. No se logró sin esfuerzo.

En el mes de diciembre de 1985 se hallaron ciertas dificultades para ajustar los datos de navegación al modelo dinámico de la trayectoria del vuelo. Hubo de realizarse un cambio bastante sustancial en la estima de la masa de Urano, que aumentó un 0,3 por ciento, antes de que la diferencia entre las predicciones y las observaciones se hiciera suficientemente pequeña para poder proseguir sin dificultades el proceso de navegación. Resultó que los programas de determinación de la órbita habían calculado incorrectamente la masa de Urano y hubo que corregirlos "manualmente".

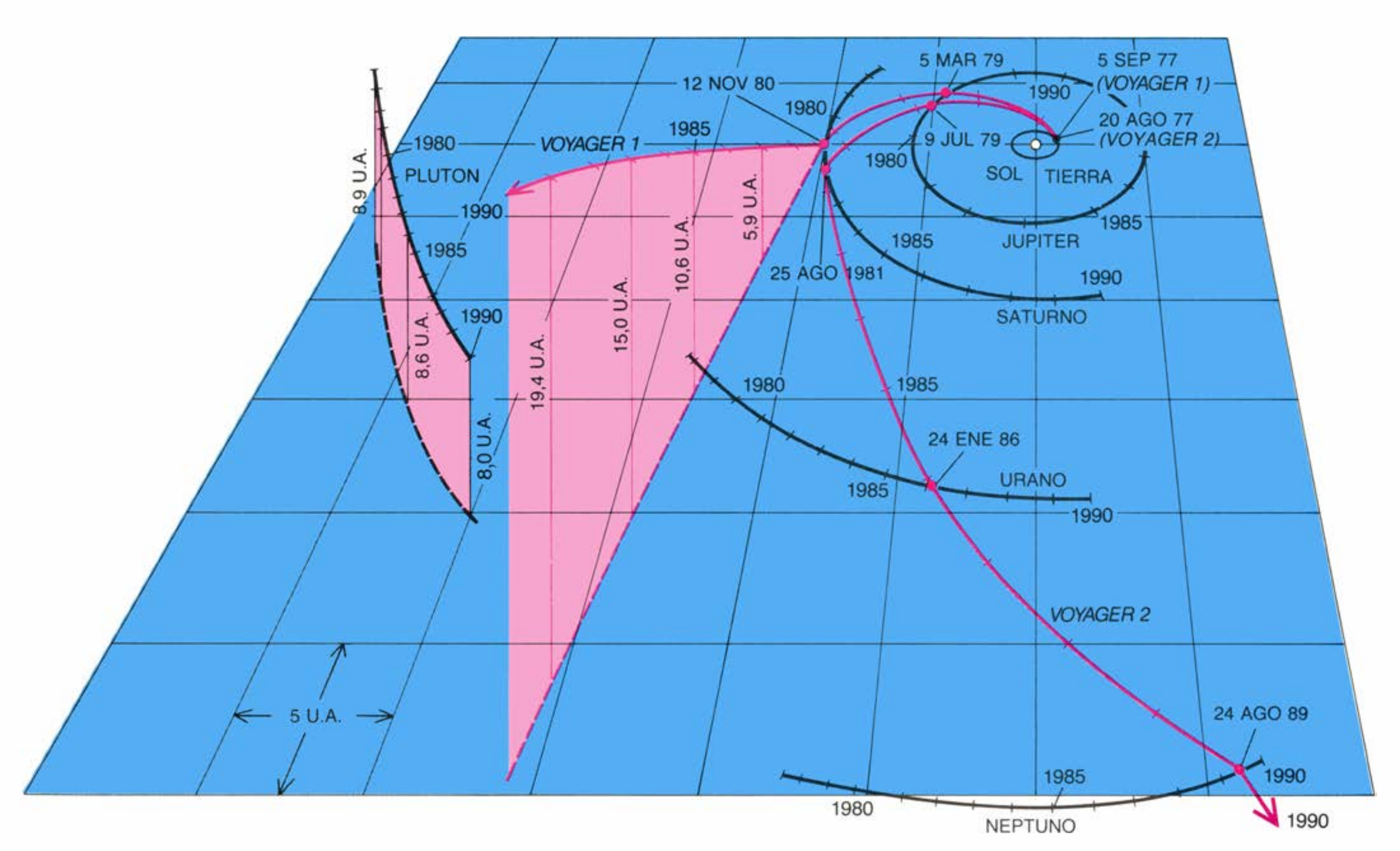
En las sondas espaciales Voyager, que ya han sobrepasado el tiempo de vida para el cual se proyectaron, los fallos son de esperar. Cuando un componente no responde, el diagnóstico del problema, su corrección o reparación o, en el peor de los casos, el tratar de pasarse sin él, ponen a prueba el ingenio del equipo del proyecto.

El más grave al que hubo de enfrentarse el equipo de vuelo se produjo en 1978, durante el viaje del *Voyager 2* de la Tierra a Júpiter: su radiorreceptor principal falló. Bien es cierto que la nave estaba dotada de un receptor de repuesto; pero también este equipo presentaba defectos. Su ancho de banda (el dominio de frecuencias en el cual se pueden recibir señales) se había reducido a menos de una milésima parte de la especificación proyectada. La causa del mal funcionamiento del receptor de repuesto se atribuyó al fallo de un condensador.

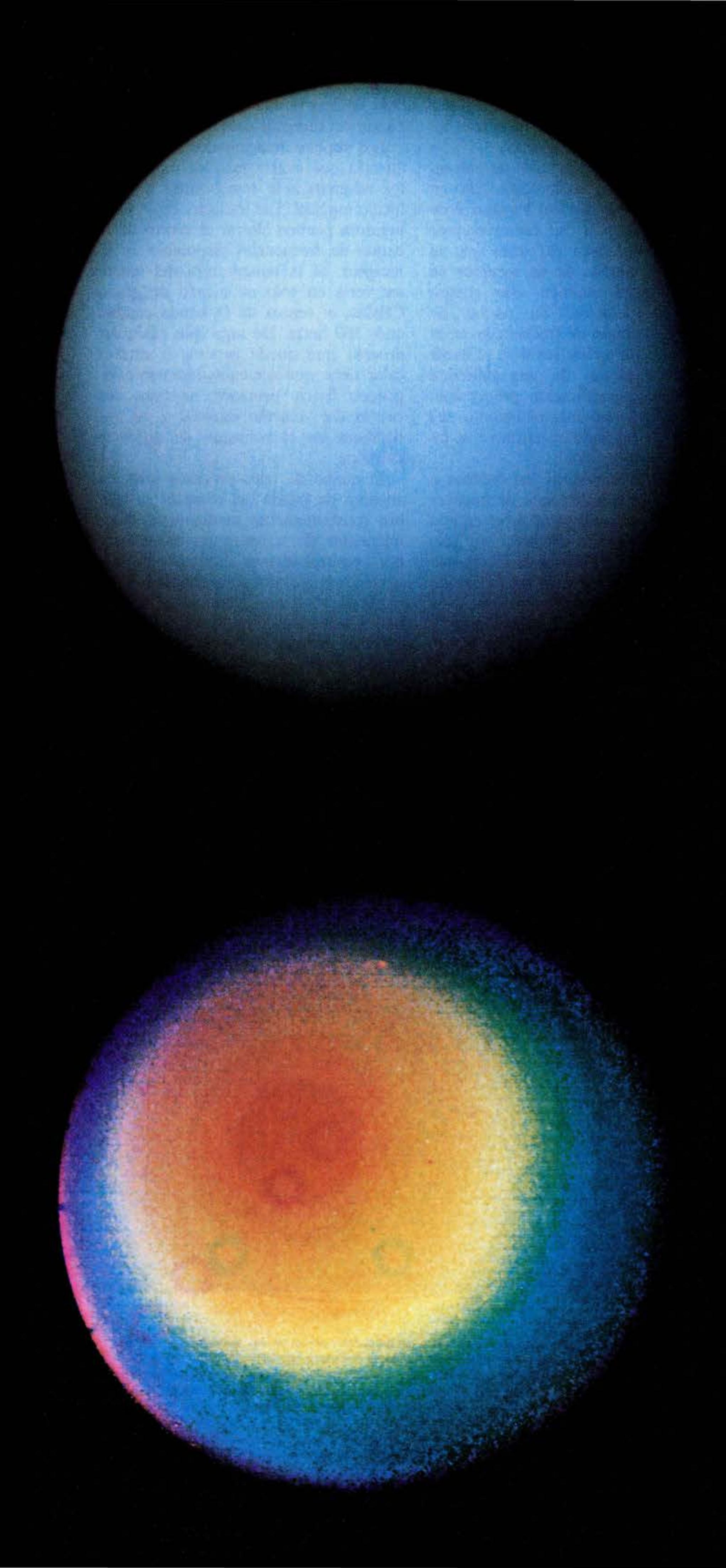
Para lograr introducir las órdenes a través de la estrecha banda de frecuencias del receptor de reserva, el equipo a cargo del vuelo ha de llevar una meticulosa cuenta de cualquier factor que pudiera alterar la frecuencia de las radioseñales recibidas. El más obvio es el corrimiento Doppler de las frecuencias debido a la rotación de la Tierra y el movimiento del vehículo espacial. La rotación de la Tierra puede alterar la frecuencia de la señal transmitida al vehículo en más de 30 veces la anchura de banda del receptor defectuoso.

Los sucesos relacionados con la frecuencia que cuesta más identificar son los relativos a la temperatura del vehículo espacial. Las variaciones de temperatura pueden alterar el centro de la banda de frecuencias disponible en el receptor. Si la temperatura del receptor varía en sólo un cuarto de grado Celsius, el centro de la banda cambia unos 100 hertz. De aquí que cualquier proceso que pueda generar o extraer calor tiene que ser cuidadosamente vigilado. Estos procesos incluyen los virajes del vehículo espacial y las variaciones en el consumo de potencia eléctrica.

El efecto de tales procesos sobre la anchura de banda del receptor se calibra constantemente mediante medidas frecuentes de temperatura a bordo y por comprobaciones directas para determinar la mejor frecuencia para la comunicación. Aunque con el tiempo se ha ido acumulando una gran reserva de conocimientos y se han desarrollado técnicas para mantener el control del *Voyager 2* por radio, las comunicacio-




7. NAVEGACION de los Voyager. Procede determinando continuamente la velocidad y posición de la nave, calculando si llegará o no a su objetivo en el instante correcto y corrigiendo su rumbo de nuevo encendiendo los impulsores. Debe tenerse en cuenta otras fuerzas que actúan sobre el vehículo espacial, principalmente las fuerzas gravitatorias y la ejercida por los fotones emitidos por el Sol. La posición y velocidad se calculan manejando dos clases de datos: los radiométricos y los ópticos. Los radiométricos se obtienen analizando las señales de radio de la nave. Los datos ópticos se obtienen de las cámaras del vehículo. Se traza la trayectoria y las maniobras de corrección necesarias se calculan a partir de los datos mediante los ordenadores de tierra. El *Voyager 1* voló sobre el polo Sur de Saturno y fue desviado por la gravedad por encima del plano de la eclíptica, que se define como el plano de la órbita de la Tierra. Ahora se encuentra a 14 U.A. por encima de dicho plano. (Una U.A., que es la distancia media de la Tierra al Sol, vale aproximadamente 150 millones de kilómetros.) El *Voyager 2*, en el plano de la eclíptica, sobrevolará el polo Norte de Neptuno el 14 de agosto de 1989. El encuentro lo desviará por debajo del plano de la eclíptica.



nes con la nave pueden verse perturbadas, a lo largo de varios días, por sucesos térmicos importantes.

Inmediatamente después de su paso por el punto de máxima proximidad a Saturno, el *Voyager 2* sufrió un fallo mecánico. El mecanismo que controla la posición azimutal de la plataforma de exploración se agarrotó. Se perdieron algunos datos científicos sobre Saturno en el incidente, pero lo que más preocupó al grupo fue la posibilidad de que la plataforma quedara inservible para los próximos encuentros con Urano y Neptuno. Para averiguar la causa de la avería y dar con un plan para resolverla, se realizaron muchas pruebas tanto en tierra como en ambos Voyager.

En el Laboratorio de Propulsión a Chorro se construyeron 86 réplicas del mecanismo y se sometieron a diversas pruebas para tratar de deducir el estado del aparato a bordo del Voyager y determinar los factores (temperatura, velocidad de operación y par aplicado) que influyeran en la posibilidad de que se atascase. Un mecanismo similar en un simulador del vehículo espacial resultó también de gran valía para obtener datos estadísticos.

El dictamen de los ingenieros y los análisis estadísticos condujeron a tres conclusiones. En primer lugar, el mecanismo probablemente funcionaría en Urano si los movimientos de la plataforma se limitasen a bajas velocidades. (Sin embargo, a causa de su valor científico, se exceptuaron cuatro movimientos a velocidad intermedia.) En segundo lugar, las observaciones en el punto de máxima proximidad a Urano habrían de asegurarse por medio de un programa de ordenador de urgencia capaz de comunicarse con el *Voyager 2,* si el mecanismo mostrase señales de agarrotamiento. El programa reemplazaría el movimiento del mecanismo de azimut por giros menos precisos y más difíciles del vehículo espacial que se llevarían a cabo encendiendo los impulsores de posición. En tercer lugar, el estado del mecanismo debería comprobarse reduciendo ocasionalmente el par aplicado y observando su comportamiento.

El equipo del Voyager puso por obra

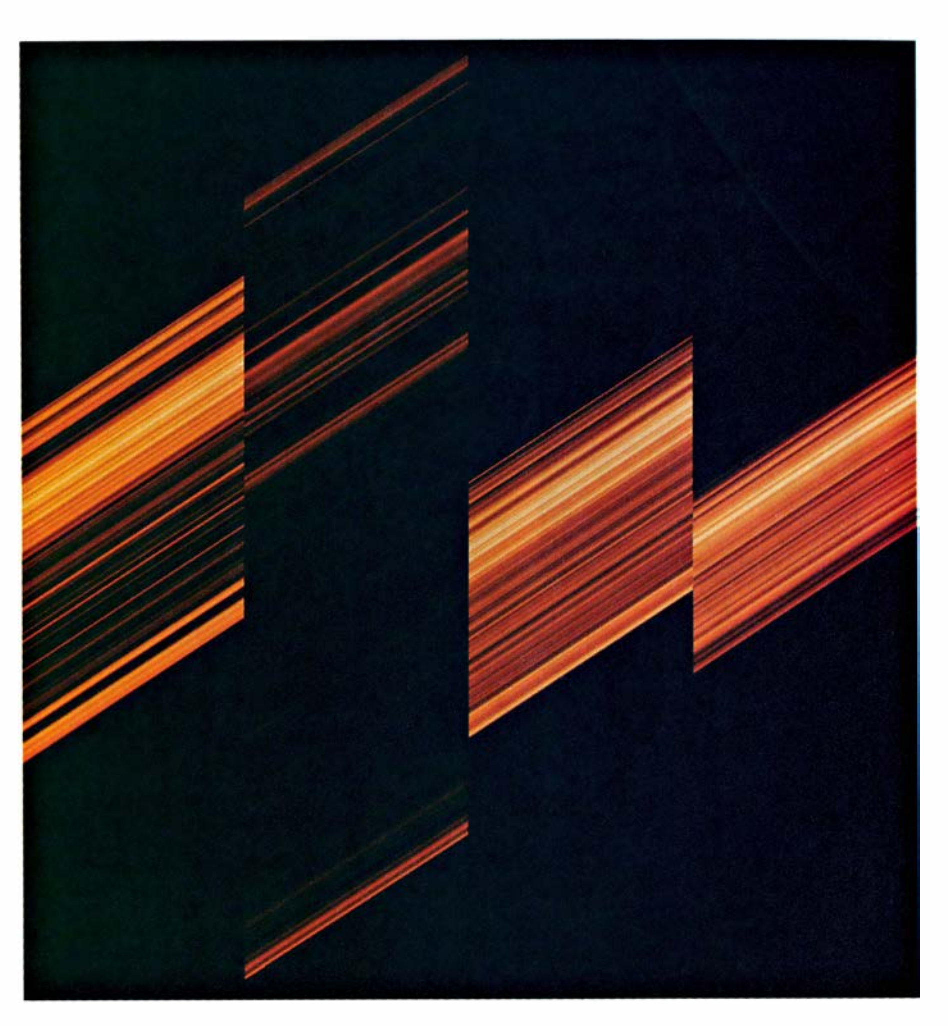
**8. URANO se vería desde el *Voyager 2* como una esfera de color azul pálido (*arriba*). La imagen es una composición de imágenes realizadas con diversas sensibilidades para los colores. Realzando las diferencias de brillo entre las imágenes, una imagen en falso color (*abajo*) hace destacar características atmósféricas que serían imperceptibles a simple vista. Las formas anulares que se aprecian son efectos causados por polvo en el sistema optico de las cámaras.**

estas recomendaciones; cuando el vehículo se aproximó a Urano, el mecanismo funcionó a la perfección. No hubo necesidad de enviar el programa de urgencia al vehículo espacial. Se tiene la esperanza de que el sistema funcione también en Neptuno.

Seis días antes de que el vehículo alcanzase el punto de máxima proximidad a Urano, se presentó otra dificultad: las fotografías de *Voyager 2* aparecían emborronadas con grandes bloques de líneas blancas y negras. Puesto que sólo imágenes comprimidas mostraban esas curiosas manchas, parecía probable que la culpa fuese del conjunto de programas usados en los ordenadores en tierra para descomprimir las imágenes. Los programas habían sido actualizados hacía poco y tal vez se habían introducido inadvertidamente algunos errores. Los ingenieros del grupo Voyager emprendieron la tediosa tarea de descomprimir a mano algunas líneas seleccionadas de las imágenes, pero seguían apareciendo las misteriosas líneas blancas y negras. La única posibilidad que quedaba era un defecto en el propio vehículo espacial.

Al día siguiente se enviaron a la nave órdenes de transmitir el contenido de la memoria del ordenador FDS que guardaba las instrucciones para comprimir las imágenes. Una vez que se recibió el listado en el Laboratorio de Propulsión a Chorro, se comparó, bit por bit, lo que había en la memoria del ordenador con lo que debería haber. Se descubrió que un único bit de una instrucción, que debía haber sido un 0, era un 1. Sólo cabía dos explicaciones: un rayo cósmico había hecho que el bit de la célula de memoria cambiase de 0 a 1, en cuyo caso se podía restablecer fácilmente el cero, o se había producido un fallo permanente en la circuitería de memoria.

Los expertos del FDS en el Laboratorio de Propulsión a Chorro se aprestaron a escribir un progrma que pudiera actuar de parche, eludiendo la posición de la posible célula averiada. El arreglo se programó en el ordenador del vehículo espacial al anochecer del 20 de enero, cuatro días antes del punto de máxima proximidad. A la mañana siguiente se reanudó la transmisión de fotografías comprimidas sin ningún defecto. Aunque la posición de memoria causante del defecto se había eludido con el parche, se transmitió también al vehículo espacial una orden que podía restablecer el bit estropeado. Este, sin embargo, no retornó a su valor correcto y se da por perdido.



**9. ANILLO EPSILON DE URANO, el más externo de los muchos que envuelven el planeta. Se caracteriza por una distribución no uniforme de masa y anchura radial. Las cuatro "rebanadas" del anillo que aquí se presentan se han reconstruido a partir de los datos obtenidos por el polarímetro del *Voyager 2*. Las zonas rojizas representan las partes del anillo que contienen menos materia; las amarillas alojan más materia. La anchura variable del anillo se deduce claramente de la diversa longitud de cada rebanada, aunque las dos que aparecen a la izquierda no están a la misma escala que las dos que se ofrecen a la derecha. Los menores accidentes discernibles tienen un diámetro de unos 270 metros. El esquema de colores realza la visibilidad de las estructuras en pequeña escala; pero no reproduce el verdadero color del anillo, que es gris.**

El éxito de los esfuerzos del grupo Voyager se puede medir por los logros científicos de la misión durante el encuentro con Urano. La mejora en la estabilidad del vehículo espacial, combinada con las posibilidades que permiten los cambios en la compresión y codificación de datos, han facilitado la búsqueda de nuevos objetos con el sistema de imágenes y el fotopolarímetro, y han conducido al descubrimiento de diez nuevos satélites de Urano y varios nuevos anillos.

La precisa navegación y la maniobra de compensación de movimiento han dado por resultado imágenes de Miranda que se cuentan entre las mejores jamás obtenidas en una misión de exploración planetaria. La ejecución del método de conservación de potencia eléctrica durante la ocultación permitió que las observaciones prosiguieran sin un fallo, y se obtuvo información detallada de la estructura de la atmósfera de Urano, incluidas su temperatura y composición. El descubrimiento de que las temperaturas en el ecuador y en los polos eran casi iguales fue algo inesperado. Durante la ocultación se tomó con éxito una imagen de 96 segundos de exposición de los anillos iluminados desde atrás que reveló una intrincada estructura de polvo dentro de los sistemas de anillos. Los magnetómetros del vehículo espacial pusieron de manifiesto otra peculiaridad de Urano: su campo magnético. Está inclinado 60 grados respecto al eje de rotación. A medida que el planeta gira con un período de 17,25 horas (hecho indicado por datos del Voyager), el campo magnético entero va cambiando.

De no producirse un fallo catastrófico en algún componente vital, se espera otra riada de valiosos datos científicos cuando el *Voyager 2* pase junto a Neptuno, desde el 5 de junio al 2 de octubre de 1989, es decir, 12 años después de su lanzamiento. Los planes actuales prevén que la nave sobrevuele el polo Norte de Neptuno a unos miles de

kilómetros por encima de sus nubes, lo que constituiría el paso más próximo a un objeto por un vehículo espacial Voyager. A partir de entonces, la trayectoria de vuelo lo llevará al sur de la eclíptica (plano orbital de la Tierra), y quizá llegue con el tiempo a alcanzar la heliopausa, frontera entre la región sometida a la influencia del Sol y el espacio interestelar.

Las técnicas de exploración remota no han logrado detectar, de manera fidedigna, la heliopausa; no podemos predecir dónde y cuándo la cruzará uno de los dos vehículos Voyager. Las estimaciones de su distancia al Sol varían de 50 a 100 unidades astronómicas. (Una unidad astronómica es la distancia media entre la Tierra y el Sol, unos 150 millones de kilómetros.) Si la heliopausa se encuentra en el guarismo menor de distancia antes indicadas, los instrumentos científicos de los Voyager podrían confirmar el hecho hacia mediados del decenio de 1990, cuando las naves se encuentren a unas 50 unidades astronómicas del Sol.

Si un fallo fatal no acaba antes con las misiones Voyager, lo hará el agotamiento de uno de los productos que consume. La velocidad con que se gasta el más sencillo de entender, el combustible para el control de posición, depende mucho de la interacción con otros elementos del proyecto de la misión. Basándonos en la cantidad de combustible gastado hasta ahora, quedaría suficiente hidrazina en ambos vehículos espaciales hasta el año 2030, aproximadamente. Una limitación más seria la tenemos en la potencia eléctrica. Se prevé que la potencia de salida de los generadores disminuya por debajo del nivel umbral (245 watt) hacia el año 2013. Por debajo de esta potencia no puede funcionar ninguno de los experimentos científicos. La limitación que podría interrumpir las dos misiones Voyager tiene que ver con la sensibilidad del sensor solar. La cantidad de luz solar puede caer por debajo del umbral de sensibilidad del sensor antes de que el generador deje de funcionar. Sin sensor con el que controlar la dirección en que apunta la antena, se perdería pronto la capacidad del Voyager para comunicarse con la Tierra.

Con la asistencia continua desde la Tierra, la más rentable misión científica de la NASA probablemente seguirá suministrando datos en el siglo venidero. El éxito sin precedentes del proyecto Voyager ratifica la preparación, ingenio y determinación del grupo del proyecto al manejarlo a través de miles de millones de kilómetros de distancia.

# Geología por interferometría de muy larga base

*Las radioseñales emitidas por cuásares, alejados de nosotros miles de millones de años luz, sirven de puntos de referencia para medir las oscilaciones de la Tierra, los cambios en su velocidad de rotación y la deriva de sus placas*

William E. Carter y Douglas S. Robertson

Lo que nosotros proponemos aquí puede en principio parecer fantástico: por la observación cuidadosa de las débiles radioseñales procedentes de cuásares, objetos cuasi-estelares que se encuentran alejados de nosotros miles de millones de años luz en los bordes del universo conocido, se pueden aprender cosas importantes acerca de la estructura de la Tierra. Y, sin embargo, esto es justamente lo que nosotros y otros astrónomos geodestas hemos estado haciendo durante la última década por medio de una técnica llamada interferometría de muy larga base (VLBI).

En VLBI, radiotelescopios situados a distancias de cientos e incluso miles de kilómetros siguen simultáneamente una misma radiofuente. Los radioastrónomos utilizan tales observaciones para generar imágenes de la fuente con la resolución angular que se obtendría mediante una antena del tamaño de un continente. Los astrónomos geodestas, por su parte, extraen de los datos una clase de información diferente. En particular, nosotros medimos cambios mínimos en la longitud y orientación de las líneas de base entre los radiotelescopios. Cuando el manto y la corteza de la Tierra oscilan unos pocos centímetros con respecto a su eje de giro, o cuando la orientación del eje de giro en el espacio se desplaza un milisegundo de arco, nosotros lo detectamos; cuando el día se hace un milisegundo más corto o más largo porque la Tierra gira más rápida o más lentamente, nosotros medimos el cambio.

Gracias a estas mediciones, los geofísicos teóricos pueden desarrollar mejores modelos de la estructura interna de la Tierra y de los movimientos de las placas de su corteza. A grandes rasgos, todo lo que se conoce acerca del interior de la Tierra se ha inferido de este tipo de mediciones indirectas; las perforaciones más profundas no han penetrado en la corteza más allá de 15 kilómetros. Aunque la sismología es, hoy en día, la mejor fuente de información geofísica que se conoce, la astronomía geodésica ha revestido, históricamente, una importancia comparable. El tamaño de la Tierra, su forma elipsoidal, el hecho de que no gira a una velocidad uniforme, que su manto y su corteza oscilan alrededor de su eje de giro y que éste tiene movimientos de precesión y de nutación en el espacio: todos estos conocimientos provienen de observaciones del Sol y las estrellas realizadas durante siglos, y todas ellas contribuyeron a nuestra comprensión de la estructura de la Tierra.

Pero la astronomía geodésica estaba atascada en las últimas décadas. Las técnicas ópticas que se apoyaban en las estrellas visibles como marco de referencia habían chocado con dos limitaciones fundamentales. Primera, porque la atmósfera refracta la luz de las estrellas de una manera impredecible, la posición de una estrella sólo puede determinarse con una precisión de una fracción de segundo de arco. Segunda, las estrellas visibles presentan movimiento propio, esto es, sus posiciones cambian con el tiempo, ya que se mueven a través de nuestra línea de mira. Las estrellas se mueven con direcciones y velocidades diferentes. Medir la posición exacta de un punto sobre la Tierra usando como referencia las estrellas visibles viene a ser como tratar de calcular la posición de un barco en que se está, observando las posiciones de otros, pertenecientes todos a una flota grande y desordenada. Lo que se necesita, obviamente, son faros fijos en la orilla.

Los cuásares son los faros. Con la VLBI, la refracción atmosférica se convierte en un problema mucho menor: la posición de un cuásar puede determinarse con una precisión de una fracción de milisegundo de arco. Al propio tiempo, los cuásares se encuentran tan alejados de nosotros que ni siquiera con VLBI se les ha podido observar ningún movimiento. Constituyen la mejor solución de un marco de referencia fijo. Y también un marco de referencia conveniente: los cuásares se distribuyen por todo el cielo y, gracias a que las nubes no bloquean sus radioemisiones, podemos observarlos llueva o apriete el sol, de día o de noche.

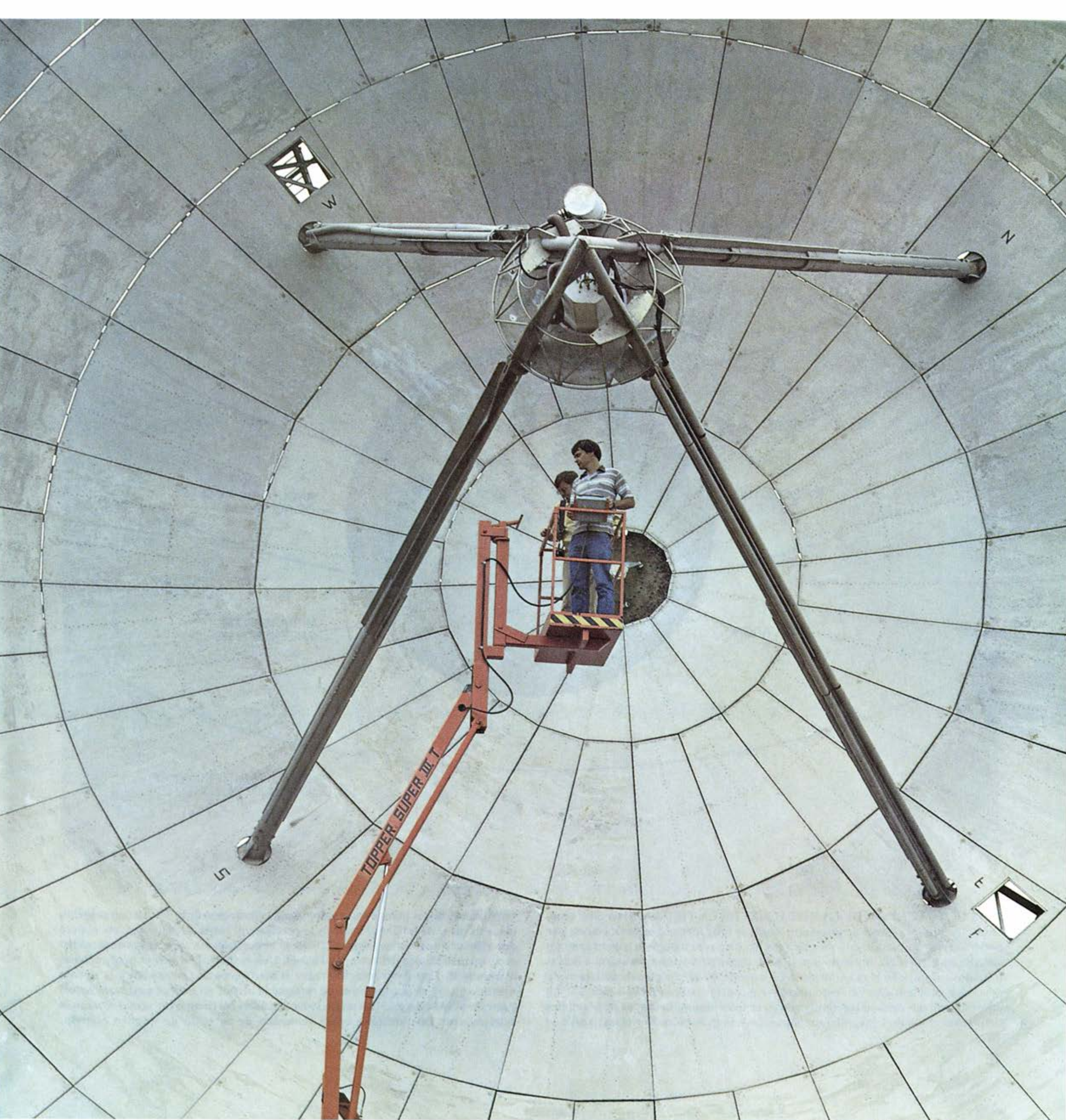
Con VLBI se detectan cambios de hasta un centímetro en las posiciones relativas de puntos sobre la Tierra. Merced a lo cual, las oscilaciones de nuestro planeta, la precesión y nutación de su eje, así como las variaciones de su velocidad de giro, pueden ahora medirse con una precisión sin precedentes. Igualmente importante, la sensibilidad de la VLBI ha permitido mensurar otra variable: el lento movimiento de las placas tectónicas de la Tierra. Son las colisiones de las placas las que, a lo largo de millones de años, hacen surgir las cadenas de montañas y es su separación la que crea los océanos. Antes, esos movimientos sólo podían inferirse a partir de los datos geológicos. Se comienza ya a medirlos directamente; a observar, por ejemplo,

**1. RADIOTELESCOPIO instalado en la sede del Observatorio Naval de Estados Unidos en Richmond, Florida, para detectar las débiles señales de los cuásares. El disco mide 17 metros de diámetro; sus paneles han sido construidos y alineados con precisión para que formen un paraboloide casi perfecto. Las ondas radio incidentes son reflejadas por el disco y detectadas por un receptor montado sobre el cuadrípode en el foco primario del paraboloide. En interferometría de muy larga base, los mismos cuásares se observan simultáneamente con telescopios alejados miles de kilómetros y se miden las líneas de base entre los telescopios.**

que las líneas de base entre radiotelescopios situados en Europa y Norteamérica están agrandándose, a una razón aproximada de un centímetro por año, a medida que los continentes se van separando y el Atlántico ensanchándose. Gracias a la VLBI asistimos al desenvolvimiento de los procesos geológicos.

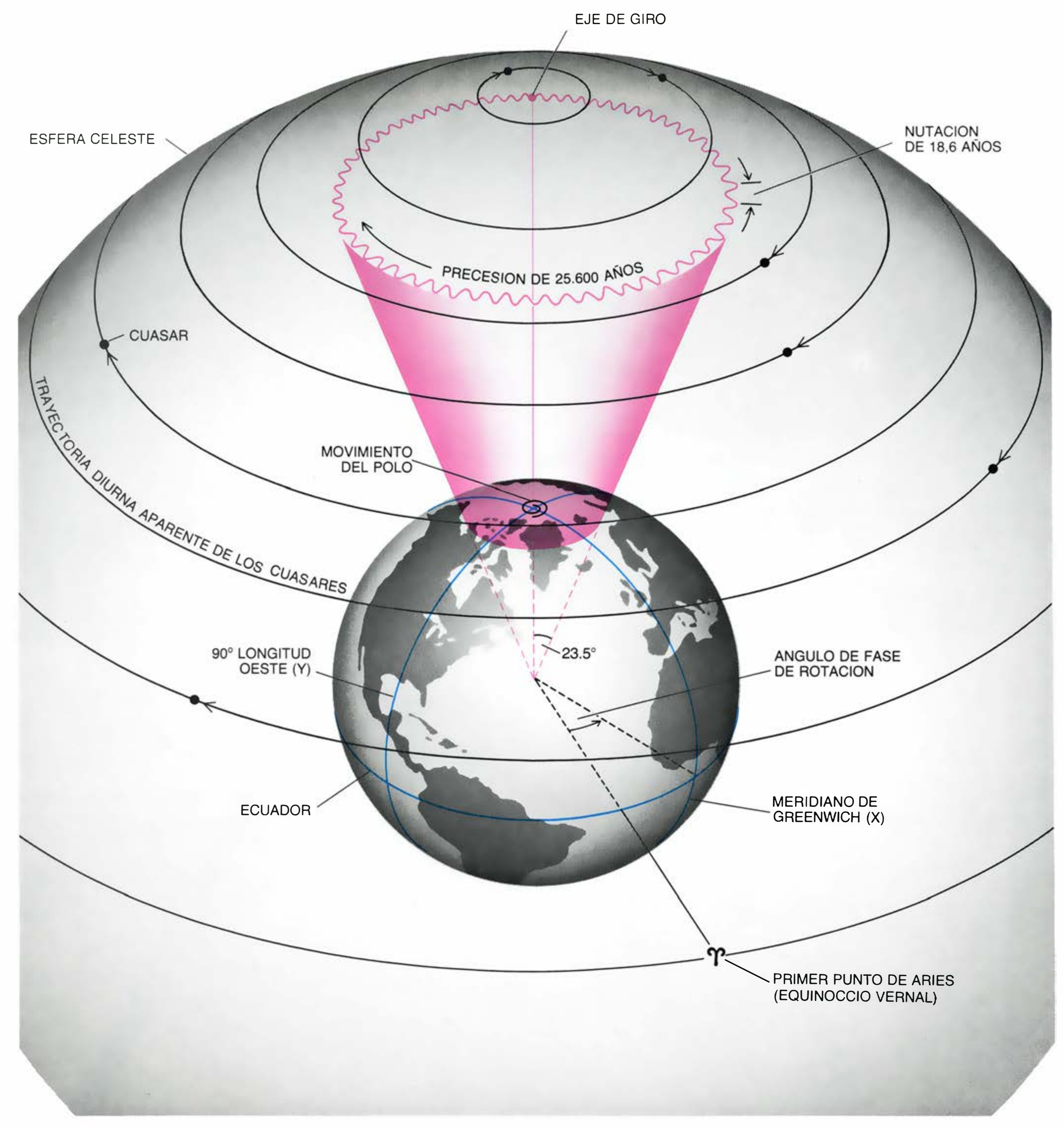
Entre los primeros investigadores que se dieron cuenta de la aplicación de la VLBI a la geofísica, merecen citarse Irwin I. Shapiro, Alan E. E. Rogers y sus colegas del Instituto de Tecnología de Massachusetts y del Centro Goddard para Vuelos Espaciales de la NASA. A raíz de los primeros resultados, el Servicio Nacional de Geodesia acometió, en 1977, un conjunto de tres observatorios para VLBI dedicados exclusivamente a medidas geodésicas. La NASA y el Observatorio Naval de Estados Unidos se unieron pronto al proyecto, denominado POLARIS, que abreviaba así las características de su función: Polar-Motion Analysis by Radio Interferometric Surveying (Análisis del movimiento del polo por observaciones radiointerferométricas).

De la primera estación POLARIS, situada cerca de Fort Davis en el estado de Texas, se responsabilizó la Universidad de Harvard; entró en funcionamiento en septiembre de 1980, e inmediatamente comenzó a realizar sesiones regulares de observación en colaboración con el Observatorio Espacial de Onsala, en Suecia, y el Observatorio de Haystack del MIT. En junio del año siguiente, un telescopio dedicado a POLARIS funcionaba en el com-



plejo de Haystack en Westford. La tercera estación POLARIS, en las instalaciones del Observatorio Naval en Miami, entró en funcionamiento en enero de 1984. Desde entonces, las tres estaciones han llevado a cabo cientos de sesiones de observación, juntas y en cooperación con otros observatorios instalados en los propios Estados Unidos, Suecia, Alemania occidental, Japón y Sudáfrica.

En el transcurso de cada sesión, dos o más telescopios siguen al mismo cuásar. Las señales recibidas son digitalizadas y registradas en bandas magnéticas, junto con marcas que dan sus tiempos de llegada para una escala de tiempo local definido por un reloj atómico. Puesto que los tiempos de llegada son registrados independientemente en cada observatorio, no se requieren enlaces de comunicación directa entre los observatorios. Estos últimos envían las bandas a un centro de correlación para su lectura y comparación de los flujos de datos correspondientes a pares de observatorios. Aun-




**2. FLUCTUACIONES DE LA ROTACION DE LA TIERRA, detectables mediante las observaciones de interferometría de muy larga base de cuásares; por hallarse éstos a miles de millones de años luz de nuestro planeta constituyen un sistema de referencia virtualmente fijo. Se llama precesión y nutación a determinados cambios en la orientación en el espacio del eje de giro de la Tierra: la precesión es el lento movimiento que hace que el eje barra un cono cada 25.600 años; las nutaciones son las minúsculas irregularidades (la mayor de las cuales tiene un período de 18,6 años) superpuestas a la precesión. Por el contrario, el movimiento de los polos es un cambio en la orientación de la Tierra con respecto al eje de giro. Al oscilar el manto y la corteza con respecto al eje de giro, el polo describe una trayectoria espiral sobre la superficie. La VLBI permite también obtener mediciones precisas del Tiempo Universal (UT1), que es proporcional al ángulo de fase de la rotación entre el meridiano de Greenwich y el círculo máximo que pasa por un punto de referencia celeste (el primer pundo de Aries) y por los polos celestes. Las mediciones tomadas del tiempo universal revelan la existencia de fluctuaciones en la velocidad de rotación de nuestro planeta.**

que los cuásares son objetos sumamente energéticos (no vamos a entrar en su naturaleza, muy controvertida), las emisiones que alcanzan la Tierra se caracterizan por su extrema debilidad. La mayoría de los bits digitales registrados en las bandas son ruido del receptor o de otras radiofuentes naturales o artificiales. A pesar de ello, podemos aislar la señal del ruido de fondo comparando los flujos de bits procedentes de los distintos telescopios: el ruido difiere en cada telescopio, pero la señal siempre es la misma en todos.

La señal llega a la Tierra convertida en una serie de frentes de onda planos. Correlacionando los flujos de datos de dos telescopios podemos determinar el tiempo de retraso entre la llegada de un frente de onda al primer telescopio y su llegada al segundo [*véase la figura 3*]. El tiempo de retraso es una medida del vector línea de base: la recta que atraviesa la Tierra desde un telescopio al otro. Más exactamente, el retraso es proporcional a la componente del vector línea de base sobre un eje en la dirección de la Tierra al cuásar. Para describir el vector en tres dimensiones, basta, en principio, con medir los tiempos de retraso para tres cuásares cuyas direcciones en el espacio establecen tres ejes perpendiculares.

En el trabajo rutinario, se realizan múltiples observaciones de unos 14 cuásares desde varios telescopios. Por una razón: hay que dar cuenta de ciertos errores minúsculos en los relojes atómicos. Cuando empezamos una sesión de observación, desconocemos qué errores se cometerán; tampoco sabemos con precisión las posiciones de los propios cuásares. Haciendo muchas observaciones y combinándolas mediante un ajuste por mínimos cuadrados (procedimiento matemático para encontrar los valores de los parámetros que mejor se ajustan a un conjunto de datos), podemos obtener estimaciones cabales de estos parámetros y al mismo tiempo de la longitud y orientación de la líneas de base entre observatorios. La única exigencia impuesta para medir una línea de base es la de que los observatorios de cada extremo distingan los mismos cuásares simultáneamente. En teoría, podríamos medir una línea de base casi tan larga como el diámetro de la Tierra (más de 12.000 kilómetros), pero en la práctica la mayor distancia de línea de base que hemos registrado es de unos 10.000 kilómetros.

Llevamos ya acumulados más de cinco años válidos de mediciones de VLBI, con una precisión de centímetros. Importa advertir, sin embargo, que cinco años no es un período largo en la escala temporal de los fenómenos geofísicos que estamos estudiando. Los resultados que vamos a examinar son, necesariamente, provisionales; sólo pretenden ilustrar la gran potencialidad de la VLBI.

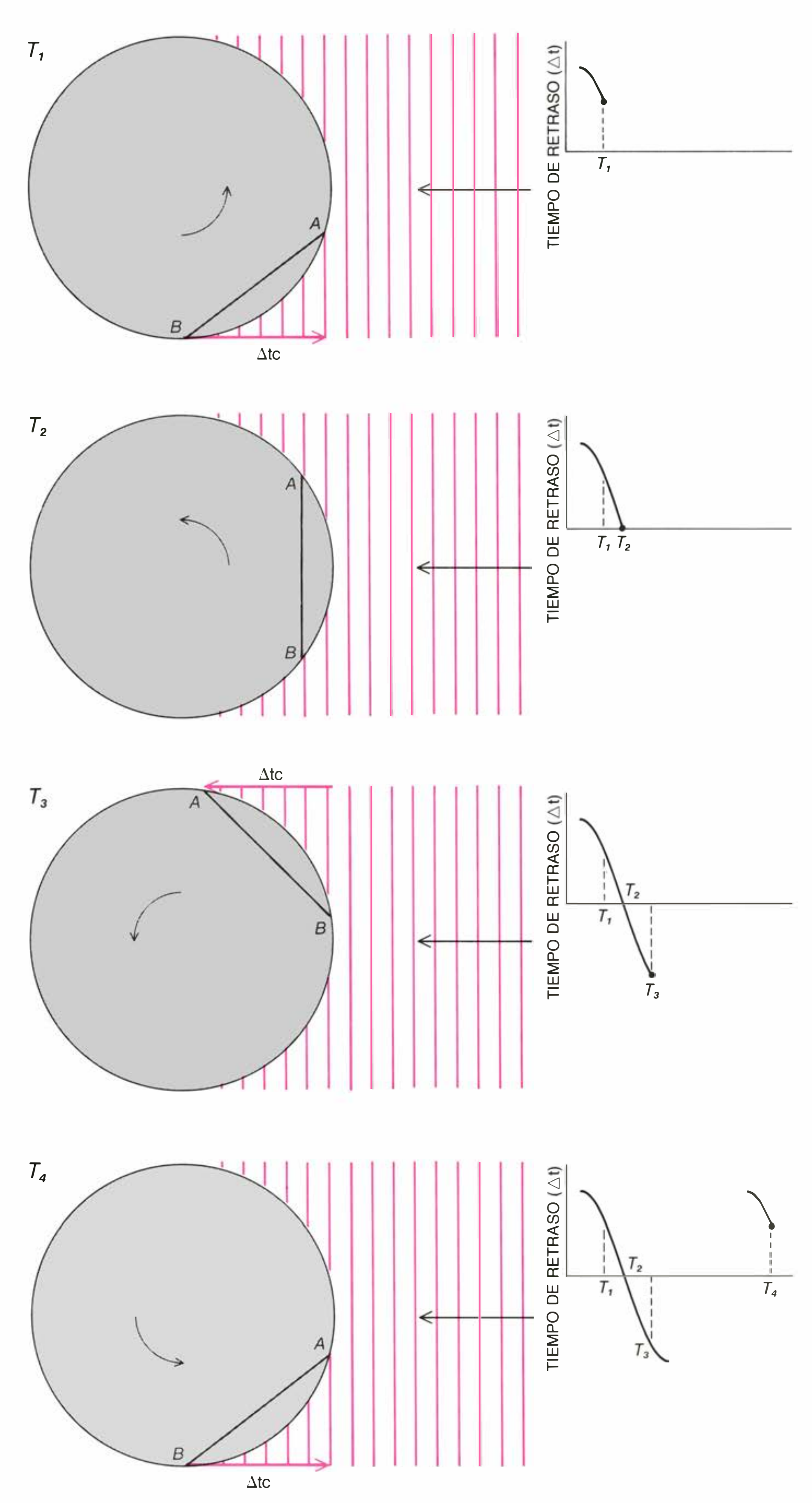
Esta cautela resulta obligada en el caso de un fenómeno que constituye uno de los más viejos rompecabezas de la geofísica: la oscilación del manto y de la corteza con respecto al eje de rotación de la Tierra. Ya en 1765 el matemático suizo Leonhard Euler manifestaba que un cuerpo rígido oscilaría de manera periódica en torno a su eje de rotación, si éste difería del eje de simetría del cuerpo. En el siglo siguiente se supuso que la Tierra oscilaría con un período de unos 305 días. En caso afirmativo, las latitudes astronómicas de todos los puntos del globo (esto es, sus emplazamientos tal como los medimos a partir de las posiciones de estrellas de referencia sobre la esfera celeste) deberían variar entonces con el mismo período.

Cuando la variación de la latitud fue detectada en la década de 1890 por el geodesta y astrónomo norteamericano Seth Carlo Chandler resultó ser más compleja de lo que se había predicho. Descubrióse que tenía dos componentes: una con un período de 365 días y una amplitud de 0,1 segundos de arco (distancia de unos tres metros sobre la superficie de la Tierra) y otra con un período de unos 430 días (14 meses) y una amplitud de 0,15 segundos de arco. El valor de 365 días se explicó como un movimiento asociado a la redistribución de las masas de aire y agua durante las estaciones. Se supuso que la componente de 430 días correspondía a la oscilación libre predicha de acuerdo con el trabajo de Euler. Ahora bien, ¿por qué su período difería del valor predicho de 305 días? El problema, como pronto explicó el astrónomo norteamericano Simon Newcomb, estribaba en que la Tierra no se comportaba como un cuerpo rígido perfecto. Cuando la elasticidad del manto y la presencia de los océanos se toman en cuenta, se descubre que el período calculado de la oscilación está en razonable acuerdo con el período observado de 430 días.

La oscilación de 430 días se conoce hoy por oscilación de Chandler. Junto con la oscilación anual, se la denomina también "movimiento de los polos", porque, cuando el manto y la corteza oscilan respecto del eje de giro, el polo traza una trayectoria espiral sobre la superficie de la Tierra. (No debe confundirse movimiento de los polos con nutación, que es un cambio en el espacio de la orientación del eje de giro.) Durante los últimos 88 años, una red mundial de observatorios equipados con instrumentos óptico-mecánicos han seguido la oscilación midiendo los cambios que produce en la latitud astronómica.

De ese seguimiento se desprende que la oscilación de Chandler es persistente, pero no se ha logrado responder a la pregunta fundamental: ¿qué la mantiene? La oscilación remeda la de un péndulo. Así como el péndulo del reloj de nuestro abuelo se habría ido parando lentamente si la energía que pierde por fricción no fuera reemplazada por la energía de las pesas que bajan, del mismo modo la oscilación de Chandler se disiparía sin el continuo suministro de energía. El eje de simetría se iría alineando gradualmente con el eje de giro, en cuyo momento la oscilación se detendría. Por el contrario, cualquier gran desplazamiento de masa en la superficie o interior de la Tierra podría excitar la oscilación al mover el eje de simetría. Los terremotos que desplazan masa en el manto podrían constituir un mecanismo de excitación. Igualmente, podrían producirla las diferencias geográficas en la distribución de vientos y corrientes oceánicas, que causan notables desplazamientos en las masas de aire y de agua. Algunos investigadores piensan también que la fusión de la nieve en Siberia y puntos similares puede provocar el desplazamiento de una masa suficientemente grande como para inducir la oscilación.

Es difícil determinar cuál de estos mecanismos es el dominante, pues ni la cantidad de energía que liberan ni la cantidad requerida para mantener la oscilación nos son bien conocidas. Con todo, cabe todavía esperar resolver la cuestión siguiendo cuidadosamente el polo y tratando de asociar los cambios de su movimiento con la ocurrencia de grandes terremotos o cambios en la distribución de los vientos, por citar dos ejemplos. Con mediciones ópticas del movimiento de los polos la tarea resultaba casi imposible: los errores de las observaciones eran grandes, comparados con los desplazamientos del polo esperados para varios mecanismos de excitación; nunca se podía estar seguro de si un movimiento observado, cuya amplitud no llegaba a un metro o tardaba menos de unos pocos meses, era o no real. Por el contrario, la precisión y la resolución temporal de



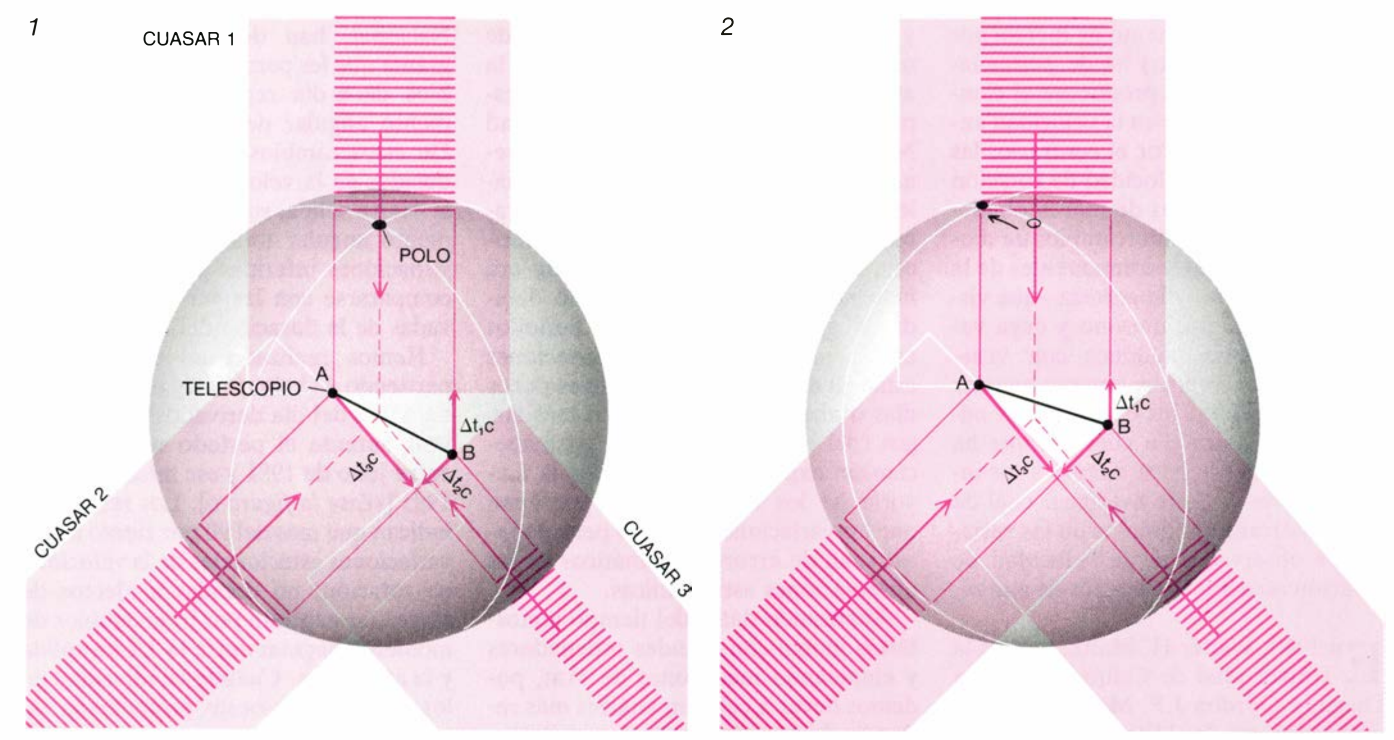

**3. LAS OBSERVACIONES DE VLBI detectan los tiempos de retraso entre la llegada de las señales de un cuásar a un radiotelescopio y su llegada a un segundo radiotelescopio. En esta ilustración ambos se encuentran sobre el Ecuador. Conforme gira la Tierra, el tiempo de retraso $\Delta t$ sigue una variación sinusoidal. En el tiempo $T_1$ la señal llega primero al telescopio *A*; en el $T_2$ llega a ambos telescopios simultáneamente, y en el $T_3$ llega primero al telescopio *B*. En el $T_4$, la Tierra ha dado una vuelta completa, y el tiempo de retraso ha vuelto a su valor en $T_1$. El intervalo entre $T_1$ y $T_4$ equivale a un día; la VLBI puede medirlo con una precisión de 0,1 milisegundos. La amplitud del retraso es proporcional a la longitud de la línea de base *AB*.**

los datos de VLBI, en los cuales el movimiento de los polos aparece como un cambio en la orientación de los vectores de la línea de base, son un orden de magnitud mayores. Hoy, la posición del polo en un día dado puede determinarse con una precisión de unos cinco centímetros.

Ahora bien, ni siquiera con los datos de la VLBI será fácil mostrar la influencia relativa de los mecanismos que compiten por excitar la oscilación. Un determinado terremoto tendría, por ejemplo, que ser muy grande para aparecer en los datos de VLBI; el sufrido por México en septiembre del año 1985 registró 8,1 en la escala de Richter, pero no dejó ningún efecto discernible en la trayectoria del polo [*véase la figura 5*]. No obstante, la energía acumulada liberada cada año por miles de terremotos podría ser suficiente para mantener la oscilación. Para sentar la cuestión de la fuente de la oscilación será necesario comparar muchos años de observaciones del movimiento de los polos con datos sobre terremotos, distribución de vientos y otros posibles mecanismos.

Mientras eso llega, los datos provisionales de VLBI aportan ya un importante resultado. Mediciones tomadas por observatorios ópticos entre 1899 y 1982 manifiestan que, además de la oscilación, el polo describe un desplazamiento secular o de largo plazo. Las estimaciones de la velocidad y dirección del movimiento secular han variado ampliamente; de acuerdo con la nuestra, el polo se desplaza unos tres milisegundos de arco por año en la dirección de 70° de longitud oeste. Algunos investigadores, sospechando errores sistemáticos en las mediciones ópticas, han dudado incluso de la realidad del movimiento secular. Los datos de los primeros cinco años de VLBI la abonan. Los datos conducen a una estimación del desplazamiento de 3,7 milisegundos de arco por año en la dirección de 45 grados de longitud oeste.

La importancia de medir con precisión el movimiento secular del polo tiene que ver con su causa: sería, así se supone, un gran desplazamiento a largo plazo de masa en el manto. Aunque el manto responde como un sólido elástico a las repentinas y débiles tensiones de un terremoto, se comporta como un fluido viscoso ante las tensiones más fuertes de largo plazo. Un tipo de tensión de largo plazo surge del avance y retroceso de los glaciares que cubren gran parte de Canadá y Escandinavia durante las glaciaciones.




**4. LONGITUD Y ORIENTACION del vector línea de base entre dos telescopios; se especifican en tres dimensiones, observando tres cuásares a la vez. El tiempo de retraso medido para cada cuásar se multiplica por la velocidad de la señal para determinar la componente del vector a lo largo de la dirección del cuásar (*1*). Un movimiento del eje de giro de la Tierra o de su manto y corteza con respecto a los cuásares cambia la orientación de la línea de base (*2*).**

Cuando los glaciares avanzan, producen una depresión en la corteza, y grandes masas de roca en el manto subyacente son empujadas hacia el Ecuador. Durante los períodos de retroceso de los glaciares, la corteza reviene y el material del manto refluye hacia el norte. De acuerdo con una teoría ampliamente aceptada, el actual flujo hacia el norte provoca el movimiento secular observado del polo, al desplazar el eje de simetría de la Tierra.

La amplitud del movimiento secular está determinada por la cantidad de flujo del manto, condicionada a su vez por la viscosidad del manto. En consecuencia, el movimiento secular puede usarse para estimar la viscosidad del manto. Esta última magnitud reviste sumo interés en geofísica: se cree que las placas que conforman la superficie de la Tierra son empujadas por un flujo convectivo del manto. Pero resulta muy difícil estimar directamente la viscosidad éste, pues no conocemos bien su composición, temperatura y estado físico. Una de las estimaciones que goza de mayor aceptación es la de William R. Peltier y sus colegas de la Universidad de Toronto, cuyos cálculos se basan en observaciones ópticas del movimiento secular. Cuando modelos como el de Peltier empiecen a incorporar datos de VLBI, mejorará la precisión con que se conoce la viscosidad del manto.

Los mismos observatorios instalados a comienzos de siglo para controlar el movimiento de los polos pusieron de manifiesto otro fenómeno de interés geofísico: las variaciones en la velocidad de giro de la Tierra. Históricamente se venía suponiendo que la velocidad de rotación era constante. El día solar constituía el patrón para medir el paso del tiempo; los relojes eran meros aparatos mecánicos para dividir el día en unidades más finas. Hacia la década de 1930, a medida que los relojes fueron mejorándose, resultó claro que no había tal constancia en la velocidad de rotación. Se descubrió que la longitud del día variaba anualmente; los días de enero eran unos milisegundos más largos que los del mes de julio.

A lo largo de las dos décadas siguientes, con la aparición de los relojes de cuarzo y, más tarde, los relojes atómicos, se detectaron otras variaciones sistemáticas en la longitud del día, en períodos de seis meses, un mes y una quincena. Estaba claro que estas variaciones debíanse, en parte, al efecto de marea, esto es, iban asociadas a los cambios producidos en la atracción gravitatoria ejercida sobre la Tierra por el Sol y la Luna. Puesto que se conocían las órbitas de la Luna y de la Tierra, se podía predecir sin dificultad las variaciones en la longitud del día por fuerzas de marea. Las mayores de ellas presentaban amplitudes de unas pocas décimas de milisegundo.

Junto a las variaciones por mareas, hay variaciones de la velocidad de rotación menos predecibles, en cuyo estudio las mediciones de VLBI se revelan de particular interés. Estas fluctuaciones se miden de modo directo. Porque la Tierra gira, el tiempo de retraso entre la llegada de la señal de un cuásar a un primer observatorio y su llegada a un segundo sigue una curva sinusoidal [*véase la figura 3*]. Para determinar la longitud del día, uno podría limitarse a medir el tiempo de retraso en un instante dado y completar entonces el tiempo que tarda este retraso en volver a tomar exactamente el mismo valor. En la práctica, nosotros medimos el Tiempo Universal (UT1), que viene dado por el ángulo de fase de rotación de la Tierra en el espacio. Un período de observación de menos de una hora con dos radiotelescopios es suficiente para determinar la orientación de la Tierra con relación a los cuásares y especificar así el UT1 con una precisión de 0,1 milisegundos. Midiendo el UT1 a intervalos de aproximadamente un día y sustrayendo medidas sucesivas, podemos calcular la velocidad media de rotación y la longitud del día.

Las variaciones en la velocidad de rotación por fuerzas de marea surgen porque los cambios en las atracciones gravitatorias del Sol y la Luna alteran la forma de la Tierra y, en consecuencia, su momento de inercia. Ya que el momento angular total de la Tierra (el

producto de su momento de inercia por su velocidad angular) ha de permanecer constante, debe producirse el cambio correspondiente en la velocidad angular del planeta. Por el contrario, las variaciones en la velocidad de rotación no debidas a efectos de marea obedecen, sobre todo, a intercambios de momento angular entre componentes de la Tierra. El manto y la corteza –que virtualmente giran al unísono y cuya velocidad angular medimos con VLBI– pueden intercambiar momento angular con la atmósfera, los océanos o el núcleo de la Tierra. La cuestión que ha interesado desde hace tiempo a los investigadores es la de averiguar cuál de estos intercambios domina en las variaciones observadas de la velocidad de rotación no debidas a efectos de marea.

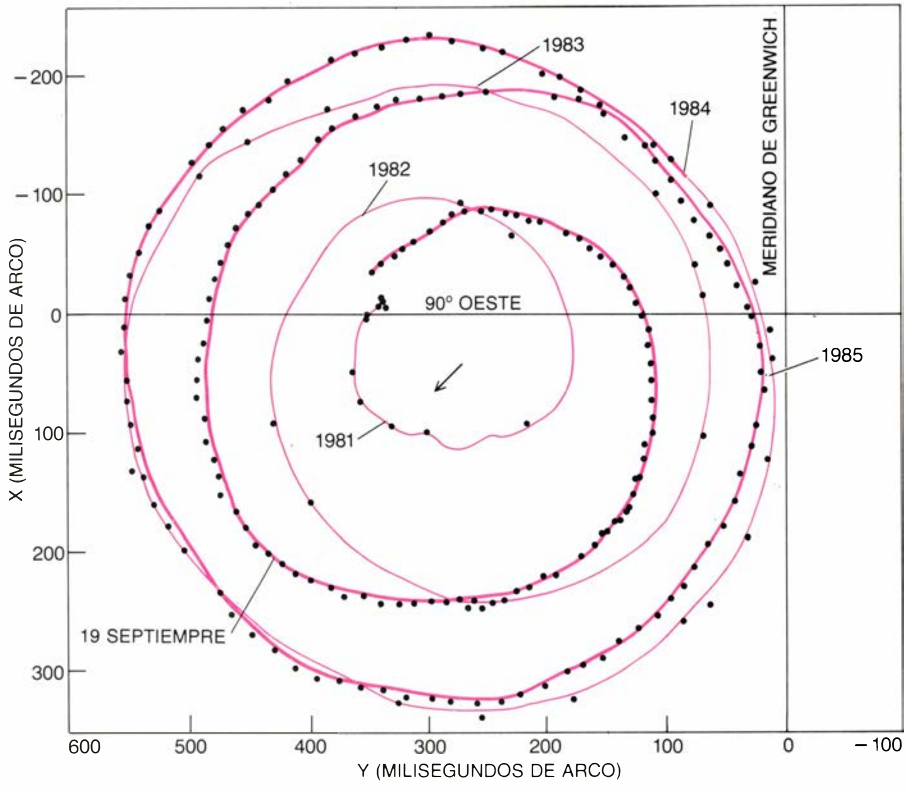
En 1960, Walter H. Munk, hoy en la Universidad de California en San Diego, y Gordon J.F. MacDonald, actualmente en la Mitre Corporation, sostenían ya que las variaciones no atribuibles a los efectos de marea, en escalas de tiempo de estaciones anuales, estaban asociadas con cambios en las distribuciones de los vientos este-oeste y, por tanto, con una transferencia de momento angular entre la corteza y la atmósfera. Más de una década después, Kurt Lambeck, de la Universidad Nacional de Australia, y Anny Cazenave, del Centro de Estudios Espaciales de las Radiaciones en Toulouse, trabajando con mejores datos atmosféricos, mostraron que esta conexión era innegable. Otras variaciones no debidas a efectos marea, cuyos períodos eran o más cortos que las variaciones estacionales (en el rango de unos pocos días o unas pocas semanas) o más largos (del orden de décadas), permanecían sin explicar. Por entonces, la mayoría de los investigadores pensaban que las variaciones de corto período resultaban de errores sistemáticos en las observaciones astronómicas.

Analizando datos del tiempo atmosférico global con grandes ordenadores y empleando mediciones de VLBI, podemos llevar a cabo un análisis más refinado de los efectos de la atmósfera sobre la rotación de la Tierra. Richard D. Rosen y David A. Salstein, de Investigaciones Atmosféricas y Ambientales, Inc., en colaboración con investigadores del Centro Meteorológico Nacional, han desarrollado un programa que les permite calcular los cambios día-a-día registrados en el momento angular de toda la atmósfera. De estos cambios se infieren los producidos en la velocidad de rotación de la Tierra sólida, suponiendo que el momento angular total se conserve. Las variaciones inferidas pueden entonces compararse con las variaciones observadas de la duración del día.

Hemos realizado tal comparación partiendo de valores muy precisos de la duración del día derivados de datos de VLBI durante el período comprendido entre julio de 1981 y ese mismo mes de 1985 [*véase la figura 6*]. Los resultados indican que más del 90 por ciento de las variaciones estacionales de la velocidad de rotación, no debidas a efectos de marea, se explican por intercambios de momento angular entre la Tierra sólida y la atmósfera. Cuando la velocidad de los vientos este-oeste promediada de todo el globo (principalmente las corrientes de chorro subtropicales) aumenta, disminuye la velocidad de rotación y el día se alarga (naturalmente, lo contrario es también cierto).

Un ejemplo dramático de este efecto ocurrió a comienzos de 1983, en el último episodio del Niño. Durante ese fenómeno climático, que se produce a intervalos irregulares de dos a seis años, los vientos alisios en dirección oeste del Pacífico ecuatorial se desvanecen; las aguas templadas de la superficie, que ordinariamente son empujadas por los vientos hacia el Pacífico occidental, vuelven erráticas hacia el este, calentando la superficie del mar frente a las costas de Sudamérica. Las anomalías oceánicas y atmosféricas están asociadas con cambios globales en la distribución de los vientos y del tiempo atmosférico. Cuando el último Niño se encontraba en su máximo en enero y febrero de 1983, el momento angular de la atmósfera alcanzó también un máximo. La transferencia de momento angular, de la corteza a la atmósfera, frenó el giro de la Tierra, alargando el día en cerca de tres milisegundos.

Las observaciones de VLBI han demostrado que las variaciones de la rotación no debidas a efectos de marea con períodos inferiores a una estación, de unos pocos días a unas pocas semanas de duración, no son meros errores en las mediciones ópticas; son reales. Obedecen también, en su comienzo, a intercambios de momento angular entre la corteza y la atmósfera. Más aún, la atmósfera constituye la fuente desencadenante de todas la variaciones no provocadas por efectos de marea con períodos de dos años o me-



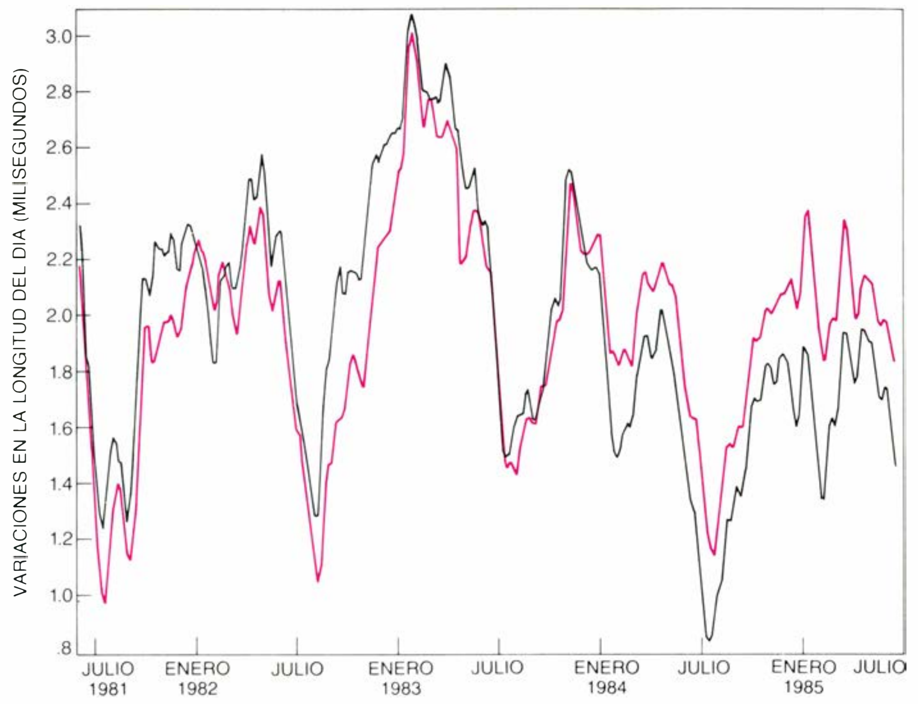

**5. MOVIMIENTO DE LOS POLOS medido por VLBI para el período de septiembre de 1980 a noviembre de 1985. Durante 1980-81 las componentes de la oscilación de 365 y 430 días estuvieron fuera de fase y tendieron a cancelarse. Por ello, la amplitud del movimiento fue relativamente pequeña. Al ir poniéndose en fase las dos componentes, la amplitud aumentó, alcanzando un pico durante 1983-84. El terremoto de México de 19 de septiembre de 1985 no tuvo efecto discernible en la trayectoria del polo. Un ciclo de oscilación completo, consistente en una espiral hacia afuera (*línea fina*) y una espiral hacia dentro (*línea gruesa*), tarda unos 6,5 o siete años. Además de la oscilación, el polo describe un desplazamiento lineal a largo plazo. A comienzos de siglo, el centro de la oscilación se encontraba en el origen de la figura y ahora se está moviendo en la dirección de unos 45 grados de longitud oeste (*fecha*) a la velocidad de 3,7 milisegundos de arco por año. (Un milisegundo de arco corresponde a unos tres centímetros sobre la superficie de la Tierra.)**

nores; los océanos y el núcleo de la Tierra parecen tener poco que ver con ninguno de ellos. Sin embargo, desde hace mucho tiempo se viene proponiendo que un intercambio de momento entre el núcleo y el manto sería la fuente de las variaciones de la rotación en escalas de tiempo de una década o mayores. Esta hipótesis se resolverá una vez dispongamos de los datos de varias décadas de observaciones de VLBI.

Indicaciones relativas a la interacción entre el núcleo y el manto nos vienen ofrecidas ya en las mediciones de VLBI concernientes a un fenómeno distinto: los cambios en la orientación en el espacio del eje de giro de la Tierra. Los cambios se controlan inicialmente por la acción de los campos gravitatorios de la Luna y del Sol sobre el abombamiento ecuatorial de la Tierra. El plano del Ecuador está inclinado un ángulo de 23,5 grados con respecto al plano de la órbita de la Tierra (la eclíptica); y siempre que la Luna y el Sol se encuentran fuera del plano ecuatorial ejercen pares de fuerzas sobre el abombamiento que tienden a moverlo hacia la eclíptica. En consecuencia, el eje de giro efectúa un movimiento de precesión, describiendo un círculo completo en el cielo cada 25.600 años. El radio angular de este círculo es igual a la inclinación del eje de giro: 23,5 grados. Superpuestas a la precesión están las nutaciones, cuyas amplitudes no llegan a los nueve segundos de arco –unas 10.000 veces menores que la amplitud de la precesión– y cuyos períodos se sitúan entre 4,7 días, un año y 18,6 años.

Conocemos los pares de fuerzas gravitatorios que controlan las nutaciones, mas para predecir la respuesta de la Tierra a estas fuerzas hay que contar con un modelo de su estructura interna. Comparando las nutaciones predichas con las observadas se puede comprobar el modelo de la Tierra. El desarrollado por John C. Wahr, de la Universidad de Colorado en Boulder, fue adoptado recientemente por la Unión Astronómica Internacional como el modelo estándar para el cálculo de nutaciones. La precisión de los cálculos de Wahr excede la de las mediciones ópticas de la nutación; su modelo sólo puede ser comprobado por medidas de VLBI.

Analizando datos de VLBI, Thomas A. Herring, Carl R. Gwinn e Irwin Shapiro han detectado un error de unos dos milisegundos de arco en el valor de Wahr para la amplitud de la nutación anual. El error sale a la luz, aducen Herring, Gwinn y Shapiro, en cuanto aceptamos que el núcleo fluido externo




**6. VARIACIONES de la longitud del día medidas por VLBI (*negro*) y su estrecha correspondencia con las variaciones inferidas de los cambios en el momento angular de la atmósfera (*color*); demuéstrase así que la atmósfera incide en la velocidad de giro de la Tierra. De los datos hemos eliminado las variaciones por efecto de marea en la velocidad de giro debidas a los efectos gravitatorios de la Luna y del Sol. Los intercambios de momento angular entre la atmósfera y la corteza dan cuenta de más del 90 por ciento de las variaciones estacionales en la velocidad de rotación no debidas a efectos de marea; también inciden de manera poderosa en las fluctuaciones de corto período. El gran pico en la longitud del día que se produjo a comienzos de 1983 coincidió con un episodio del Niño. En esta ocasión, el momento angular se transfirió de la superficie a la atmósfera; la Tierra se frenó y los vientos este-oeste, en particular las corrientes del norte, se intensificaron.**

de la Tierra es ligeramente más plano de lo que supone Wahr. (El núcleo es elipsoidal: su diámetro ecuatorial mide 6971 kilómetros, mientras que su diámetro polar es solamente de 6954 kilómetros.)

La explicación se apoya en el hecho de que la Tierra tiene un modo de nutación libre, no forzado por los campos gravitatorios del Sol y la Luna. Aunque no se ha observado nunca la así llamada nutación del núcleo libre, su existencia se deduce de la presencia en la Tierra de un núcleo fluido elipsoidal. Al no hallarse el núcleo rígidamente ligado al manto, su eje de giro tampoco necesita estar alineado con el eje de la cavidad formada por el borde núcleo-manto. Si los dos ejes no estuvieran alineados, el eje del núcleo poseería un movimiento de precesión en torno al eje de la cavidad, y aunque el módulo del vector momento angular del núcleo no cambiase, sí lo haría su dirección.

Ya que el momento angular total de la Tierra debe conservarse en módulo y dirección, el manto tendría también un movimiento de precesión, en la misma dirección que el núcleo pero desfasado de éste en 180°. El movimiento del manto, que arrastra consigo la corteza, es, en principio, observable como una minúcula nutación del eje de giro de la Tierra.

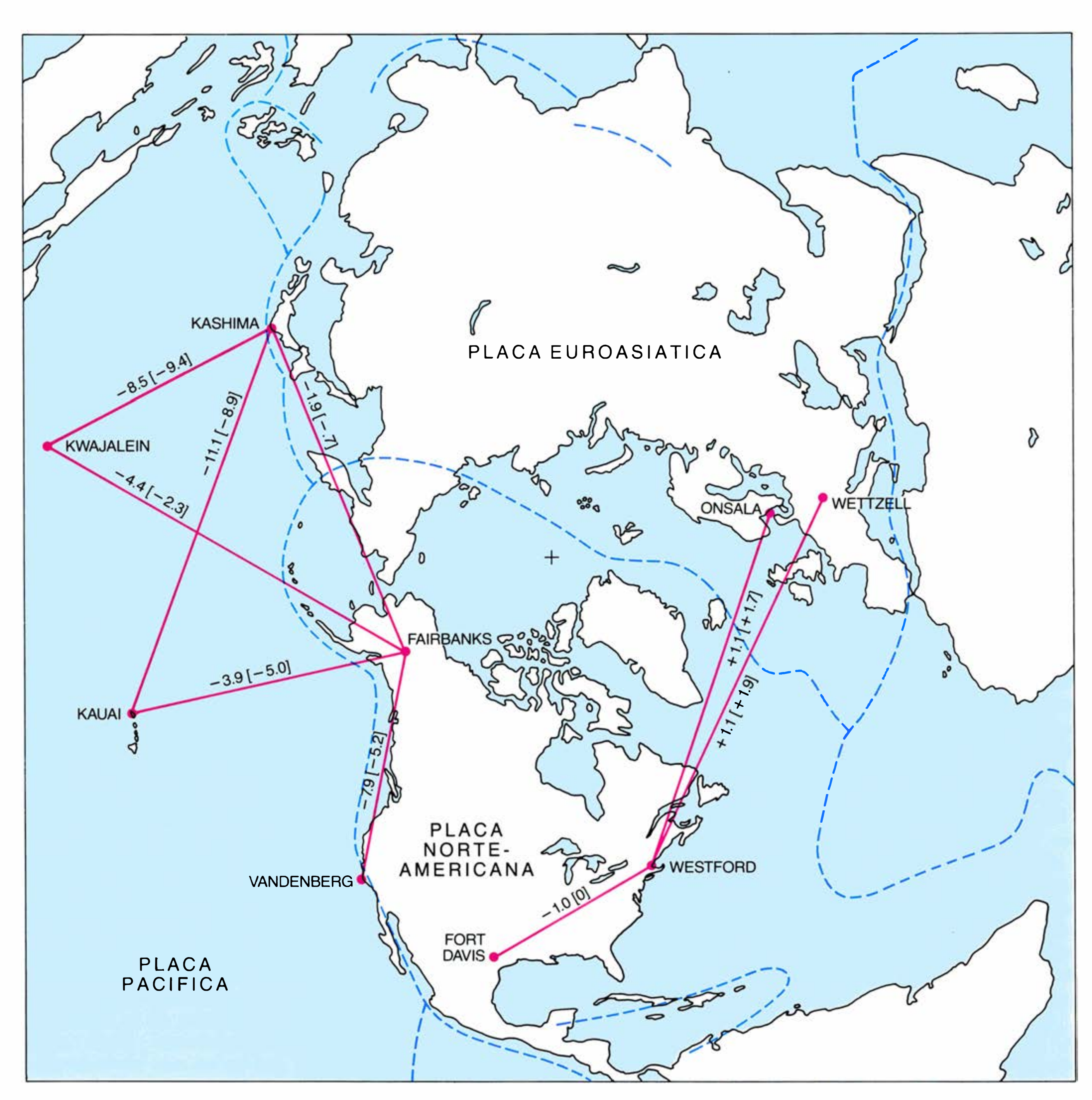
Más importante aún, la presencia del modo de nutación libre afecta a la respuesta que la Tierra ofrece a las fuerzas que controlan otras nutaciones, incluida la anual. La magnitud de este efecto depende del período de la nutación del núcleo libre, que según predice el modelo de Wahr debería ser de unos 460 días. Herring y sus colegas han mostrado que un período 30 días más próximo al período de la fuerza que controla la nutación anual cambiaría la respuesta de la Tierra a esta fuerza en la cuantía justa para eliminar el error de dos milisegundos en la nutación anual. A su vez, el período de la nutación del núcleo libre depende estrechamente de la elipticidad del borde núcleo-manto. El grupo de Harvard ha calculado que un núcleo de sólo 0,5 kilómetros más aplanado que el valor asumido por Wahr acortaría el período de 460 a 430 días.

Ese sutil refinamiento es significativo, pues no se olvide que la forma del núcleo es un parámetro crítico en los modelos del interior de la Tierra. El anómalo aplanamiento puede estar causado por los mismos procesos convectivos en el manto que dirigen las placas de la superficie terrestre. El refinamiento se obtuvo gracias a la extraordinaria precisión de las observaciones de VLBI, que siguen las nutacio-

nes con una exactitud superior al milisegundo de arco. Considerando cuán poco sabemos acerca del núcleo y sus interacciones con el manto, las mediciones de VLBI constituyen una nueva fuente valiosa de información.

En contraste con el núcleo, disponemos de una abundante información acerca de la superficie de la Tierra y las placas cuyos movimientos determinan su topografía. Los movimientos relativos de las placas son del orden de centímetros por año; en general se cree que se conocen con una precisión de un centímetro o menos. Thomas H. Jordan, del MIT, y J. Bernard Minster, de Horizontes de la Ciencia, Inc., han desarrollado modelos por ordenador que predicen las velocidades de los movimientos entre puntos de diferentes placas, fundándose en los registros geológicos. Con todo, estos modelos construyen hipótesis simplificadoras. Asumen que las placas avanzan rígidas a velocidad constante, sin admitir movimiento dentro de las placas. Las observaciones de VLBI prometen someter a prueba estas hipótesis midiendo los cambios en las longitudes de las líneas de base.

El grueso de las observaciones acumuladas hasta ahora ha venido de los telescopios POLARIS y de los observatorios de Europa con los que colaboran. El único borde entre placas medido por esta red es la Dorsal Mesoatlántica, a lo largo de la cual las placas de Norteamérica y la Euroasiática se están separando al tiempo que magma caliente brota del manto y forma nuevas crestas oceánicas. Se ha




**7. MOVIMIENTOS DE LAS PLACAS: cambian la longitud de las líneas de base entre radiotelescopios de diferentes placas. El mapa del hemisferio Norte muestra las líneas de base para las que se han acumulado tantas mediciones de VLBI que permiten obtener estimaciones fiables de las velocidades de cambio (en centímetros por año). Los números que aparecen entre corchetes son los movimientos de las placas predichos por un modelo teórico. En general, las velocidades predichas y las medidas están en bastante buen acuerdo. Una excepción es la línea de base en Fort Davis y Westford: teóricamente no debería haber movimiento entre puntos de la misma placa, pero los datos obtenidos por interferometría de muy larga base indican que la línea de base se está encogiendo.**

predicho que los movimientos relativos a lo largo de las líneas de base que cruzan ese borde no llegan a los dos centímetros por año. Las mediciones por VLBI de las líneas de base entre Westford, así como las tomadas por los telescopios de Onsala (Suecia) y Wettzell (Alemania occidental), son coherentes con la predicción: las longitudes de las líneas de base están aumentando a razón de uno o dos centímetros por año.

Por otro lado, las longitudes de las líneas de base exhiben asimismo grandes fluctuaciones aleatorias. Partiendo, pues, únicamente de estos datos habría que mostrarse reacios a concluir que estamos midiendo los movimientos de las placas. Afortunadamente, nuestra confianza se ve reforzada con los trabajos paralelos de Robert J. Coates, Thomas Clarke y sus colegas, de la NASA, quienes acaban de abordar una serie de observaciones con una red de estaciones situadas en las placas Norteamericana, del Pacífico y Euroasiática. Se espera que, en su mayoría, los movimientos a través de los bordes de las placas medidos por su red sean notablemente mayores que los movimientos a través de la Dorsal Mesoatlántica. Las mediciones obtenidas por el grupo de la NASA no difieren significativamente de los valores predichos. Parece, pues, que la VLBI está captando las placas tectónicas en su acción.

Una vez que hayamos acumulado suficientes observaciones que nos den certeza de que las mediciones de los movimientos de las placas son precisas, tales mediciones tendrán un gran valor para comprobar la teoría de la tectónica de placas. Uno de nuestros resultados provisionales parece ya contradecir una hipótesis importante de la teoría. Las observaciones de POLARIS indican que la línea de base entre Westford y Ford Davis está encogiéndose alrededor de un centímetro por año. Teóricamente no debería haber cambio en la longitud de la línea de base, ya que las dos estaciones se encuentran sobre la misma placa, que se supone rígida. Hay todavía alguna duda sobre si el movimiento de compresión observado es real; podría ser el resultado de un error sistemático todavía sin identificar. Y aún más, como han calculado Steven A. Musman y Thomas Schmitt, la tensión producida por la compresión de la corteza podría ser coherente con la frecuencia con que ocurren terremotos en el este de los Estados Unidos. Conforme las mediciones de VLBI vayan avanzando, la tectónica de placas podría resultar más complicada de lo que muchos geofísicos habían pensado.

# Ciencia y sociedad

## *Nobel de medicina y fisiología*

¿Qué controla el desarrollo de un organismo, desde el óvulo fecundado hasta el complejo sistema constituido por miles de millones de células especializadas? Parte de la respuesta reside en un tipo de proteínas de señalización, los denominados factores de crecimiento, cuyos primeros ejemplos conocidos los descubrieron, en la década de 1950, Rita Levi-Montalcini, actualmente en el Instituto de Biología Celular de Roma, y Stanley Cohen, hoy en la Facultad de Medicina de la Universidad Vanderbilt. Por su esfuerzo conjunto se les ha otorgado el premio Nobel de medicina y fisiología de 1986.

Levi-Montalcini descubrió el primer factor de crecimiento durante su estancia en la Universidad de Washington en St. Louis. A la sazón investigaba el desarrollo del sistema nervioso en embriones de pollo. Se conocía ya que el injerto de un tumor de ratón en el embrión de pollo estimulaba, en éste, la proliferación de tejido nervioso. Levi-Montalcini descubrió que el fenómeno se producía aunque no se hubiera establecido contacto directo entre el tumor y el embrión: bastaba su conexión por vasos sanguíneos. Más tarde escribiría la autora: "Aparentemente, el tumor liberaba algún factor químico que, a su vez, inducía aquel asombroso crecimiento" de células nerviosas en el embrión [véase "El factor de crecimiento nervioso", por Rita Levi-Montalcini y Pietro Calissano; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, agosto de 1979].

En 1953 Cohen se unió al equipo de Rita-Montalcini. A él cabe atribuir la purificación del factor de crecimiento nervioso (FCN) y la demostración de que es una proteína. Según se ha comprobado, del FCN depende la supervivencia de las células nerviosas simpáticas en el transcurso del desarrollo. Lo sintetiza un amplio abanico de tejidos y, así parece, orienta las fibras nerviosas hacia los órganos que habrán de inervar: las fibras crecen en dirección a las fuentes de FCN.

Durante sus estudios sobre el FCN, Cohen descubrió otro factor de crecimiento, que denominó de crecimiento epidérmico (FCE). (Se comprobó más tarde que la estimulación instada por el FCE no afectaba sólo a la piel, sino también a otros muchos tipos celulares.) Cohen purificó la proteína y determinó su secuencia de aminoácidos; asimismo, identificó el receptor que une el FCE a la superficie celular. "Por primera vez," señala el Instituto Carolino en el anuncio de la concesión del premio a Cohen, "los científicos disponían de un factor [que] permitía el estudio del crecimiento." Es más, la interpretación del crecimiento normal constituye el paso previo a la comprensión de las alteraciones patológicas de ese proceso.

## *Nobel de física*

Dos logros de aplicación práctica, a los que se ha concedido el premio Nobel de física de 1986, encuentran sus raíces en la mecánica cuántica, juzgada a menudo el arcano de la ciencia hecho carne: el microscopio electrónico y el de efecto túnel.

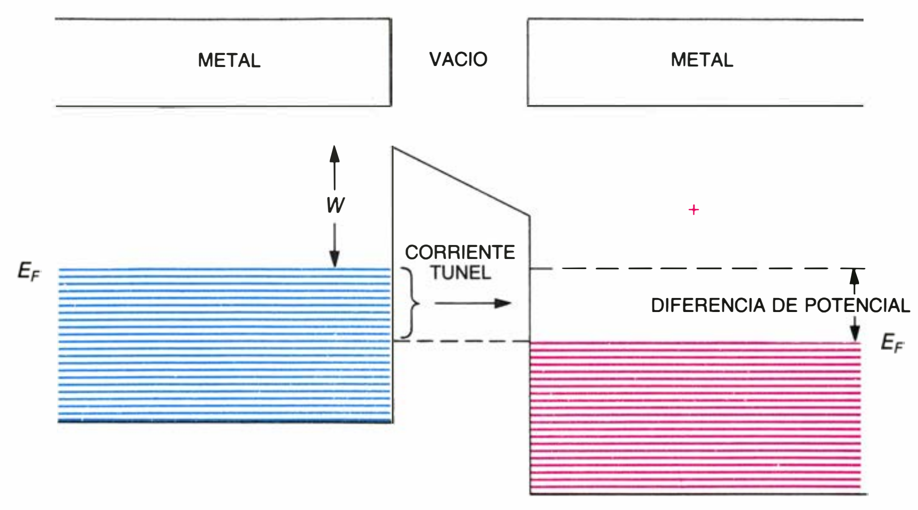



*DIAGRAMA ENERGETICO esquemático del efecto túnel en el caso de dos metales (**$E_F$** = nivel de Fermi; **W** = trabajo de fuga)*

El galardón concedido a Ernst Ruska, apartado ya de la investigación, llega con retraso: construyó el primer microscopio electrónico en 1933, en la Universidad Politécnica de Berlín, con lo que venía a aplicar el postulado mecánico-cuántico según el cual el electrón es, a la vez, onda y partícula. La longitud de onda del electrón es miles de veces menor que la de la luz visible. Ruska y otros autores sabían que, por esa razón, el poder de resolución del microscopio electrónico superaría en mucho el del óptico; sólo faltaba el procedimiento que permitiera enfocar los electrones para obtener la imagen.

La aportación de Ruska consistió en el desarrollo de bobinas magnéticas que actuaban de lentes electrónicas. Más tarde, trabajando para la empresa Siemens, participó en la elaboración del primer microscopio electrónico fabricado en gran escala. Los descendientes de aquel ingenio se encuentran hoy en todos los laboratorios biológicos y médicos.

El microscopio de efecto túnel, inventado hace pocos años por Gerd Binning y Heinrich Rohrer, del Laboratorio de Investigación IBM de Zurich, explota de un modo distinto la naturaleza ondulatoria de los electrones [véase "El microscopio de efecto túnel", por Gerd Binning y Heinrich Rohrer; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, octubre de 1985]. Puesto que los electrones se comportan como ondas, sus posiciones están indeterminadas; algunos "se fugan" de un objeto y forman una nube sobre su superficie. En el microscopio de efecto túnel se acerca una delgada sonda (cuyo vértice sólo consta a veces de un átomo) hasta sólo un nanómetro de la muestra, de tal modo que las dos nubes electrónicas entran en contacto. La aplicación de una diferencia de potencial genera una corriente eléctrica entre la sonda y la muestra: la corriente túnel.

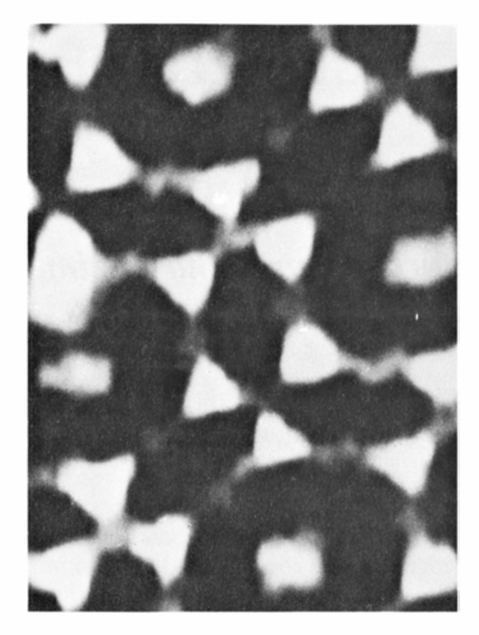
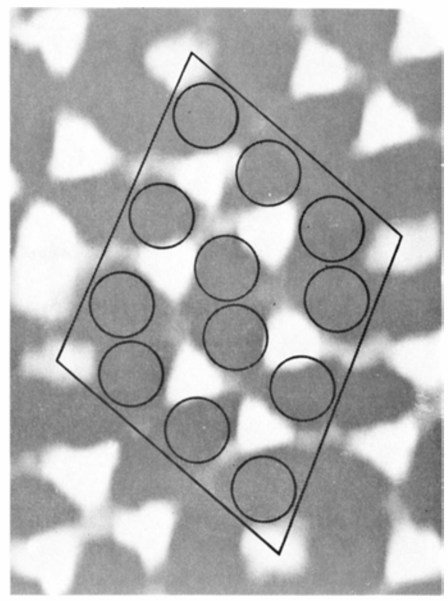
Puesto que la densidad de las nubes electrónicas decrece exponencialmente en función de la distancia, el menor cambio de la separación entre la sonda y la muestra se refleja espectacularmente en la intensidad de la corriente túnel. Sirve ésta, por tanto, para controlar un mecanismo de retroalimentación que mantenga la sonda a altura constante. A medida que la sonda avanza por la superficie de la muestra van midiéndose sus movimientos verticales. La resolución vertical de esas mediciones es de alrededor de una centésima de nanómetro; así, detecta con facilidad los abombamientos superficiales creados por los átomos.

El funcionamiento correcto del mi-

croscopio de efecto túnel exige su total aislamiento de cualquier vibración externa. Por resolver ese problema de diseño han recibido el premio Nobel Binning y Rohrer. Su dispositivo encontrará aplicación inmediata en la industria de la microelectrónica. Y más aún, a juicio del comité Nobel, el invento ha abierto las puertas "de campos enteramente nuevos. . . para el estudio de la estructura de la materia".

## *Nobel de química*

Al calentar en un Erlenmeyer dos productos químicos a veces se obtiene un tercero. Diremos entonces que la substancia *A* ha reaccionado con la *B* y se ha formado *C*; ignoraremos, sin embargo, los pormenores de los procesos registrados en el nivel molecular: la energía que poseían las moléculas *A* y *B* en el momento del choque, o si *C* fue un producto directo de la colisión o bien se formó a partir de un complejo intermedio inestable. Se ha galardonado con el premio Nobel de química a Dudley R. Herschbach, de la Universidad de Harvard, Yuan T. Lee, de la Universidad de California en Berkeley, y John C. Polanyi, de la Universidad de Toronto, por aportar "una interpretación mucho más detallada del desarrollo de las reacciones químicas".

*ENLACES ATOMICOS entre átomos de silicio (***manchas negras***), que se distinguen en esta imagen obtenida con un microscopio de efecto túnel como manchas de color claro. Los enlaces se proyectan de la superficie de la segunda capa de átomos de la muestra. En el dibujo (***derecha***), el perfil en diamante resigue una celda unidad de silicio, que consta de doce átomos*

Herschbach es uno de los pioneros del método de haces moleculares cruzados: se aceleran dos haces de moléculas hasta energías conocidas y se provoca su colisión bajo cierto ángulo. Por medición de las energías y de las distribuciones angulares de los productos de la reacción cabe inferir la interacción que se ha establecido entre parejas de moléculas de los haces. Valiéndose de esa metodología, Herschbach ha analizado diversos tipos de reacciones directas; también ha descubierto reacciones indirectas en las que participan complejos intermedios de vida larga. Lee, que empezó trabajando en el laboratorio de Herschbach, ha mejorado el aparato de cruce de haces, lo que ha permitido el análisis de reacciones complejas, de interés en la química de la combustión y en la atmosférica.

De modo independiente, Polanyi ha desarrollado una técnica de análisis de los productos de reacción de los experimentos de haces cruzados. En ciertas reacciones químicas, la energía sobrante se acumula en las moléculas del producto, que en última instancia la emiten en forma de radiación infrarroja. La medición y el análisis de emisiones infrarrojas de intensidad minúscula han permitido a Polanyi evaluar la proporción, de la energía total de la reacción, que se almacena en forma de vibración y la que se imparte a las moléculas producto en calidad de movimiento cinético. El reparto de energía informa, a su vez, de las fuerzas interatómicas que gobiernan la reacción. El descubrimiento, obra de Polanyi, de la "quimioluminiscencia" infrarroja emitida por moléculas sometidas a excitación vibratoria ha llevado al desarrollo de láseres químicos.

## *Cuásar infrarrojo*

Los objetos casi estelares (cuásares) son cuerpos celestes extraordinariamente brillantes que distan de la Tierra miles de millones de años-luz. Su núcleo, donde se genera la energía, no mide más que el Sistema Solar, no obstante lo cual los cuásares emiten más luz que galaxias compuestas de miles de millones de estrellas. Los cerca de 3500 cuásares catalogados hasta la fecha emiten la mayor parte de su radiación en el ultravioleta, en el visible o en la zona del espectro electromagnético correspondiente a las ondas de radio. Llamaba la atención que ningún cuásar emitiera predominantemente en el infrarrojo.

Se ha descubierto ahora un ejemplo de ese tipo de cuásar. Charles A. Beichman, B. Thomas Soifer, George Helou, Thomas J. Chester y Gerry Neugebauer, del Instituto de Tecnología de California, Frederick C. Gillett, del Observatorio Optico Astronómico de los Estados Unidos, y Frank J. Low, de la Universidad de Arizona, informan en *Astrophysical Journal Letters* del descubrimiento de un cuásar infrarrojo, al que han bautizado 13349 + 2438. En primera instancia se detectó el objeto como una fuente de infrarrojo, por los datos recogidos por el *Satélite Astronómico Infrarrojo* (*IRAS*); se comprobó que se trataba de un cuásar mediante observaciones con telescopios terrestres, ópticos y de radio.

Los infrarrojos encajan nítidamente en la teoría de la evolución de los cuásares que goza de más amplia aceptación, según la cual esos cuerpos derivan de la colisión de dos galaxias. La radiación infrarroja del tipo que se observa en 13349 + 2438 resultaría del caldeamiento de las gruesas nubes de polvo interestelares generadas en la colisión. Hasta que se disipara el polvo, las nubes taparían la radiación que habitualmente se asocia a los cuásares; entonces escaparía la radiación no infrarroja y se detectaría en la Tierra.

En la escala de los cuásares, 13349 + 2438 no dista excesivamente de nuestro planeta: alrededor de mil millones de años-luz. Lo que da pie a sospechar que quizá se estén formando ahora mismo otros, más próximos aún a nosotros. Muchos atrónomos consideran que la formación de cuásares sólo tuvo lugar en la historia temprana del universo, pues todos parecían ser objetos distantes. Sin embargo, si se encuentran cuásares infrarrojos en puntos menos lejanos, deberá revisarse esa hipótesis.

# Función enzimática del ARN

*Durante mucho tiempo se creyó que todas las reacciones celulares estaban catalizadas por una proteína enzimática. El descubrimiento de que el ARN puede cortar y empalmar ARN debilita este principio*

Thomas R. Cech

En una célula viva, los ácidos nucleicos ADN y ARN contienen la información necesaria para el metabolismo y la reproducción. Por su parte, las proteínas son moléculas funcionales: en su acción enzimática catalizan todas las reacciones químicas en las que se basa el metabolismo celular. Hasta hace muy poco tiempo se pensaba que estas categorías eran excluyentes. La verdad es que la división del trabajo celular entre moléculas que portan la información y moléculas catalíticas ha constituido uno de los principios básicos de la bioquímica. Sin embargo, en los últimos años, este esquema tan sencillo se ha visto trastocado por el descubrimiento de que un ARN podría ejercer funciones enzimáticas.

El primer ejemplo de un ARN con actividad catalítica lo descubrió, en 1981 y 1982, nuestro grupo de trabajo cuando estudiaba un ARN del protozoo *Tetrahymena termophila.* Para nuestra sorpresa observamos que este ARN podía catalizar las reacciones de corte y empalme que conducían a la eliminación de parte del ARN. Si se nos concediera pasar por alto que no se trata de ninguna proteína, el ARN de *Tetrahymena* se aproximaría mucho a la definición de enzima. Las enzimas actúan, además, sobre otras proteínas, pero no sobre sí mismas, como hace el ARN de *Tetrahymena.* Por esa razón creamos un término nuevo para designar al ARN semejante a la enzima: "ribozima". Recientemente, sin embargo, hemos hallado que una forma ligeramente diferente del mismo ARN catalizaba la síntesis de ARN distintos de sí mismo, lo que la convertía en una enzima en todo el sentido de la palabra.

¿Qué supone el asombroso descubrimiento de un ARN con actividad enzimática? La primera consecuencia es que ya no se podrá nunca más dar por descontado que detrás de toda actividad catalítica celular hay una proteína. Por lo que sabemos, algunas de las operaciones que conducen a la forma final de la molécula de ARN están catalizadas, en parte al menos, por un ARN. Es más, el ribosoma (el orgánulo donde se sintetizan las proteínas) consta de varias moléculas de ARN y múltiples proteínas. Es posible que el catalizador de la síntesis de proteínas, una de las principales actividades biológicas, no sea tanto la proteína del ribosoma cuanto su ARN. La catálisis por ARN tiene también consecuencias evolutivas. Por ser interdependientes los ácidos nucleicos y las proteínas se ha defendido insistentemente que han tenido que evolucionar conjuntamente. El descubrimiento de que el ARN puede ser tanto un catalizador como una molécula que lleva la información sugiere que, cuando se originó la vida, el ARN pudo haber funcionado sin ADN ni proteínas.

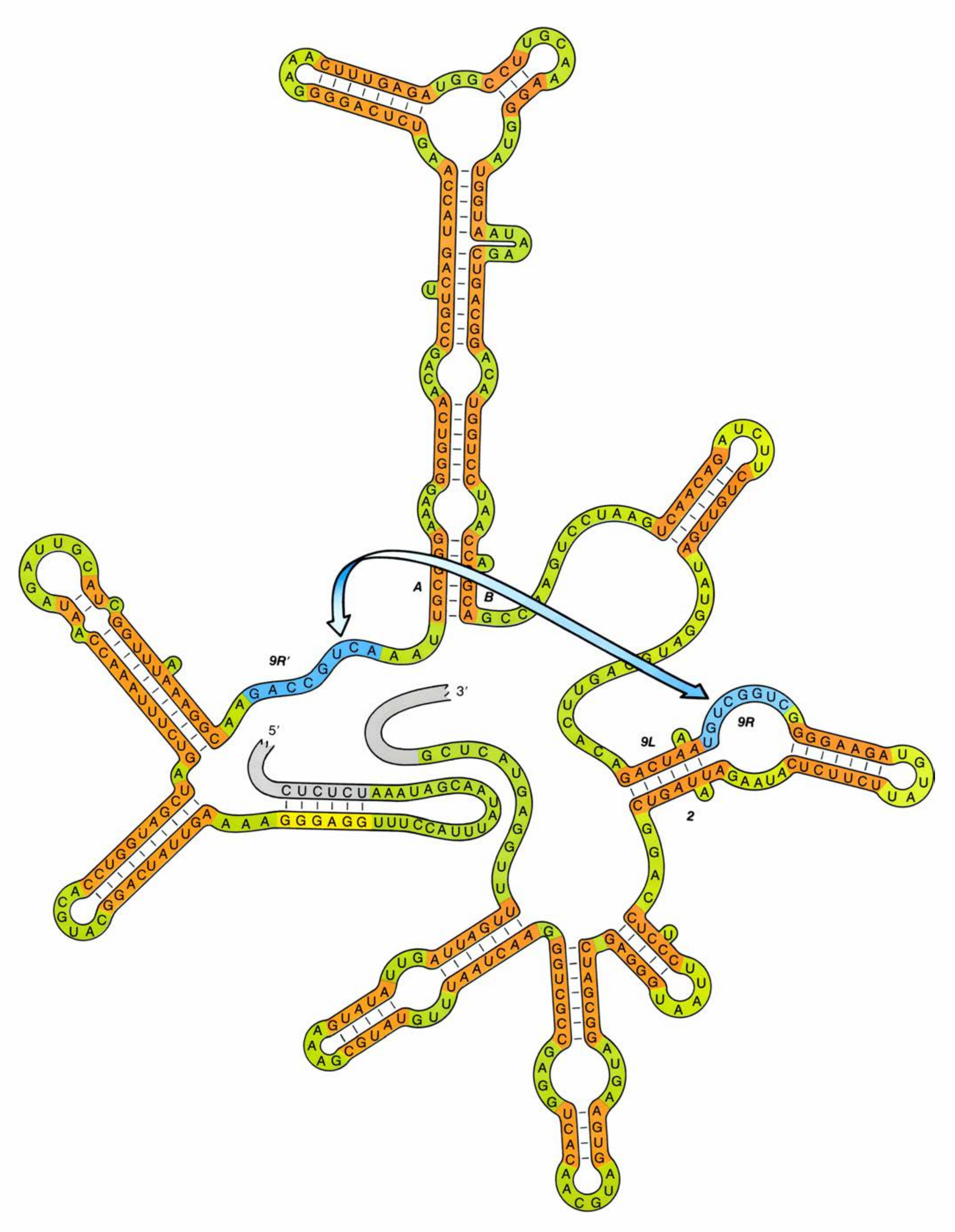
## Necesidad de los catalizadores

¿A qué se debe la importancia de los catalizadores en los sistemas biológicos? La necesidad de los catalizadores procede fundamentalmente de la propia naturaleza de las moléculas biológicas. Las moléculas que operan en los procesos celulares suelen ser bastante estables; si no hay ninguna intervención externa, las moléculas son excesivamente pesadas y lentas para reaccionar. Las enzimas activan estas interacciones y las introducen en una escala de tiempo que es compatible con la vida. Se trata de un trabajo que realizan muy bien. Cada proteína enzimática acelera una reacción bioquímica en un factor que varía de un millón a un trillón. Constituye, pues, un auténtico catalizador: al final de la reacción la enzima aparece con la misma forma que tenía al principio.

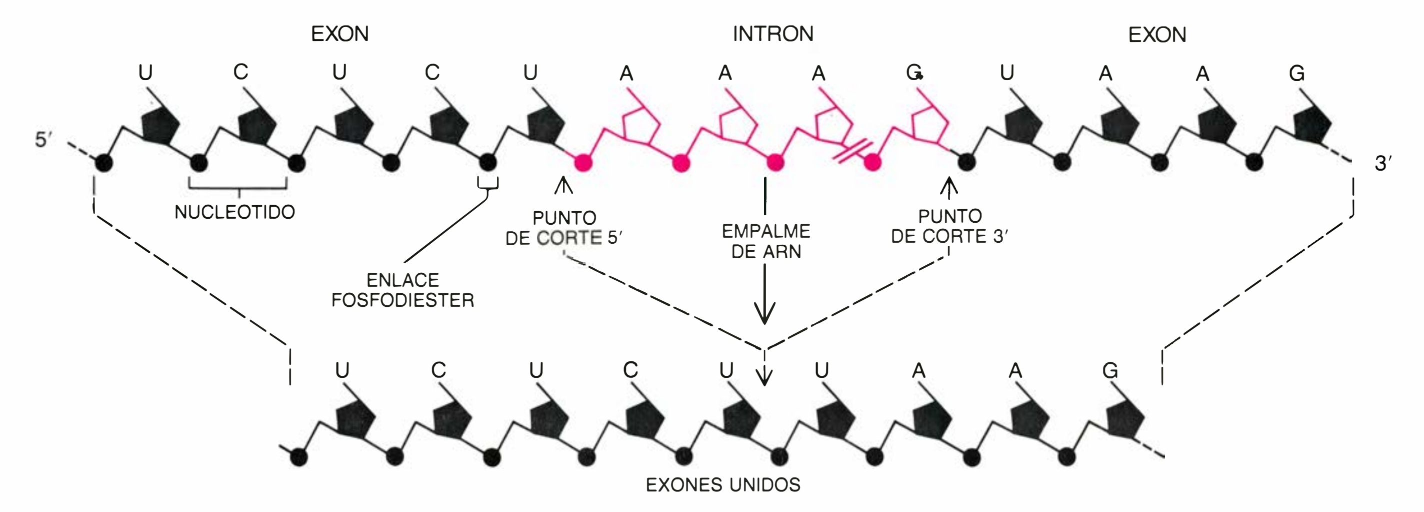
Es fácil comprender por qué llegó a aceptarse, entre los estudiosos de la célula, que todas las enzimas eran proteínas. En las décadas que siguieron a la purificación, en 1926, de la primera enzima (la ureasa, que ayuda a descomponer la urea) por James B. Summer, de la Universidad de Cornell, se purificaron cientos de ellas. En todos los casos, se encontró que la enzima era una proteína: una cadena de aminoácidos unidos entre sí y plegada en una configuración tridimensional específica. A lo largo de los años se fue desentrañando el funcionamiento enzimático. Vióse que cada enzima catalizaba una sola reacción bioquímica o un grupo de reacciones afines. Esta especificidad exquisita venía posibilitada gracias al plegamiento de la cadena, que confería a la proteína una forma apropiada para su participación en una interacción química determinada.

Durante las décadas de 1930 y 1940, se descifró el lugar catalítico de la célula, pero la comprensión de los aspectos informativos andaba muy retrasada. En 1944 se produjo uno de los mayores avances, cuando Oswald T. Avery y sus colegas, del Instituto Rockefeller para Investigaciones Médicas, descubrieron que el ADN era capaz de transmitir información genética específica. Otro de los avances importantes se produjo en 1953, cuando James D. Watson y F. H. C. Crick dieron a conocer la estructura del ADN. Estos estudios, junto con otros muchos, aclararon lo que hoy se da por establecido: que la información genética reside en la secuencia de nucleótidos del ADN de doble hélice. Cada una de las fibras de la molécula de ADN de doble hebra es un polímero cuyas subunidades son los nucleósidos adenosina ($A$), guanosina ($G$), timidina ($T$) y citidina ($C$), presentados en la forma nucleotídica de monofosfato. El ARN es un polímero de una sola hebra con una estructura similar, que, en vez de timidina, posee uridina ($U$).

Poco después de que se comenzara a comprender la estructura y el signifi-




**1. ESTRUCTURA PLEGADA** de un ARN del protozoo *Tetrahymena*; desempeña un papel crucial en la actividad catalítica de la molécula. Esta estructura se produce, en parte, por la capacidad de la hebra, única, de ARN para doblarse sobre sí misma formando breves regiones bicatenarias. El ARN es un polímero cuyas unidades son nucleósidos: adenosina (*A*), guanosina (*G*), citidina (*C*) y uridina (*U*). Los nucleósidos con ácido fosfórico constituyen los nucleótidos; aquí aparecen en forma de monofosfato. *A* y *U* son complementarios, o buenos para aparearse, al igual que *C* y *G*. (*U* y *G* pueden aparearse también, aunque su interacción es más débil.) Por tanto, si dos tramos de una molécula de ARN contienen los nucleótidos apropiados, se pueden unir y establecerse segmentos bicatenarios (*naranja*). Además, interacciones distantes —como las que se producen entre las regiones marcadas como *9R* y *9R′* (*azul*)— conducen a una configuración compleja. Esta configuración ayuda al ARN de *Tetrahymena*, que contiene componentes del orgánulo ribosoma, a eliminar una parte de su propia extensión llamada intrón. La mayor parte de la estructura plegada que se muestra en la figura está en el intrón; solamente se muestra una pequeña fracción del resto del ARN (*gris*). Los modelos de plegamiento, todos ellos bastante similares, se han sometido a estudio en diversos laboratorios, incluido el del autor.




**2. SE ELIMINA EL INTRON y se unen los exones adyacentes produciendo una molécula de ARN funcional. Cada nucleótido de la cadena de ARN tiene un azúcar de cinco átomos de carbono (*pentágonos*), una de las cuatro bases (indicadas por *A*, *G*, *C* y *U*) y un grupo fosfato (*círculos*). Los nucleótidos adyacentes se engarzan por enlaces fosfodiéster. Como el enlace se extiende desde el carbono 5′ de un azúcar hasta el 3′ del siguiente, la cadena presenta un extremo 5′ y un extremo 3′. Cuando se procesa una cadena de ARN, los enlaces fosfodiéster de ambos extremos del intrón se rompen y los puntos de empalme se unen.**

cado del ADN se encontró que el ARN desempeñaba varios papeles decisivos en la transferencia de la información genética desde el ADN hasta la proteína. La primera etapa de la expresión de un gen consiste en la transcripción de la secuencia de nucleótidos del ADN en la secuencia de nucleótidos correspondiente de un ARN mensajero (ARNm). El ARNm se une al ribosoma, donde sirve de molde para la síntesis proteica.

El transporte del mensaje genético es una función más del ARN. El ribosoma está formado por varias moléculas de ARN ribosómico (ARNr). Además, otro ARN pequeño, conocido por ARN de transferencia (ARNt), ayuda a engarzar, en el orden correcto, los aminoácidos en la cadena de proteína que se está formando. A finales de los años 1970 ya se conocía bastante bien el papel del ARNm, del ARNr y del ARNt. Diríase que el ARN no encerraba ya ningún misterio. Se trataba de una apariencia engañosa.

## Genes "fragmentados"

En 1977, dos grupos de investigadores —Philip A. Sharp y sus colaboradores, del Instituto de Tecnología de Massachusetts, y otro grupo del Laboratorio de Cold Spring Harbor— se asombraron ellos mismos y sorprendieron al resto de la comunidad científica cuando descubrieron la existencia de genes "fragmentados" en los organismos superiores. Se encontraron con que la secuencia de nucleótidos del ADN que codifica una proteína no se disponía de una forma continua, como todos suponían, sino que las secuencias codificantes estaban interrumpidas por tramos largos de ADN no codificante. Estos tramos que interrumpen la secuencia reciben el nombre de intrones, o secuencias intermedias; se llama exones a las secuencias codificantes divididas. Poco después se pudo averiguar el destino de los intrones: concluida la transcripción del ADN en ARN, los intrones se cortan y se empalman los exones formando una molécula continua.

El descubrimiento del empalme del ARN revistió un extraordinario interés por una serie de razones. Una de éstas: el proceso de empalme tenía lugar en eucariotas, pero no en procariotas, al menos no se producía en uno de los organismos procariotas mejor estudiados, la bacteria *Escherichia coli*. Los eucariotas son organismos —desde las levaduras hasta los seres humanos— dotados de células nucleadas. Las células de los procariotas —bacterias y determinadas algas— carecen de núcleo. Parecía bastante lógico admitir que el estudio del proceso de empalme del ARN arrojara luz sobre la evolución de los eucariotas, incluida su capacidad para desarrollar las células especializadas y organizadas de los seres pluricelulares. También parecía razonable pensar que el empalme del ARN proporcionaría una nueva forma de regulación de la expresión génica.

A finales de los años 1970, muchos laboratorios —el mío entre ellos— seguían trabajando en el problema de la expresión génica. Nosotros, en particular, estábamos estudiando los genes del ARNr del eucariota unicelular *Tetrahymena termophila*. Si queríamos averiguar el mecanismo de expresión de estos genes, necesitábamos resolver la serie de cortes y empalmes y otras etapas del procesamiento que originan los ARNr completos. Hacia 1980 conocíamos ya los rasgos principales del esquema del procesamiento. Como todos los eucariotas, *Tetrahymena* tiene cuatro ARN ribosómicos, de los cuales tres se transcriben en una sola unidad de ARN. A continuación se cortan los transcritos primarios resultantes, se empalman y se modifican originando las moléculas maduras.

En una de las primeras etapas del procesamiento, que se desarrolla en los primeros segundos después de la transcripción, se suprime un intrón, de unos 400 nucleótidos de longitud, del transcrito primario de 6400 nucleótidos; según se va cortando el intrón, se van uniendo los exones vecinos (empalme). En 1980, mi colega Arthur J. Zaug y yo vimos que la reacción de empalme se producía con un alto grado de eficacia en tubos de ensayo que contenían mezclas de núcleos de *Tetrahymena* aislados. En 1980 hacía ya unos años que se conocía el proceso del empalme de ARN, pero se ignoraba el mecanismo a través del cual acontecía; por eso Zaug y yo decidimos empeñarnos en la búsqueda del proceso exacto de eliminación del intrón de *Tetrahymena*.

El primer paso para desentrañar el proceso consistió en establecer las necesidades mínimas requeridas para conseguir el empalme en un tubo de ensayo. Con ese propósito se mezclaron pre-ARNr sin cortar con extractos de núcleos de *Tetrahymena*, los cuales suponíamos que servirían de fuente de las posibles enzimas de procesamiento. Añadimos algunas moléculas pequeñas: sales y nucleótidos. En la forma de trifosfato los nucleótidos suelen proporcionar la energía para las reacciones celulares, por lo que se agregaron por

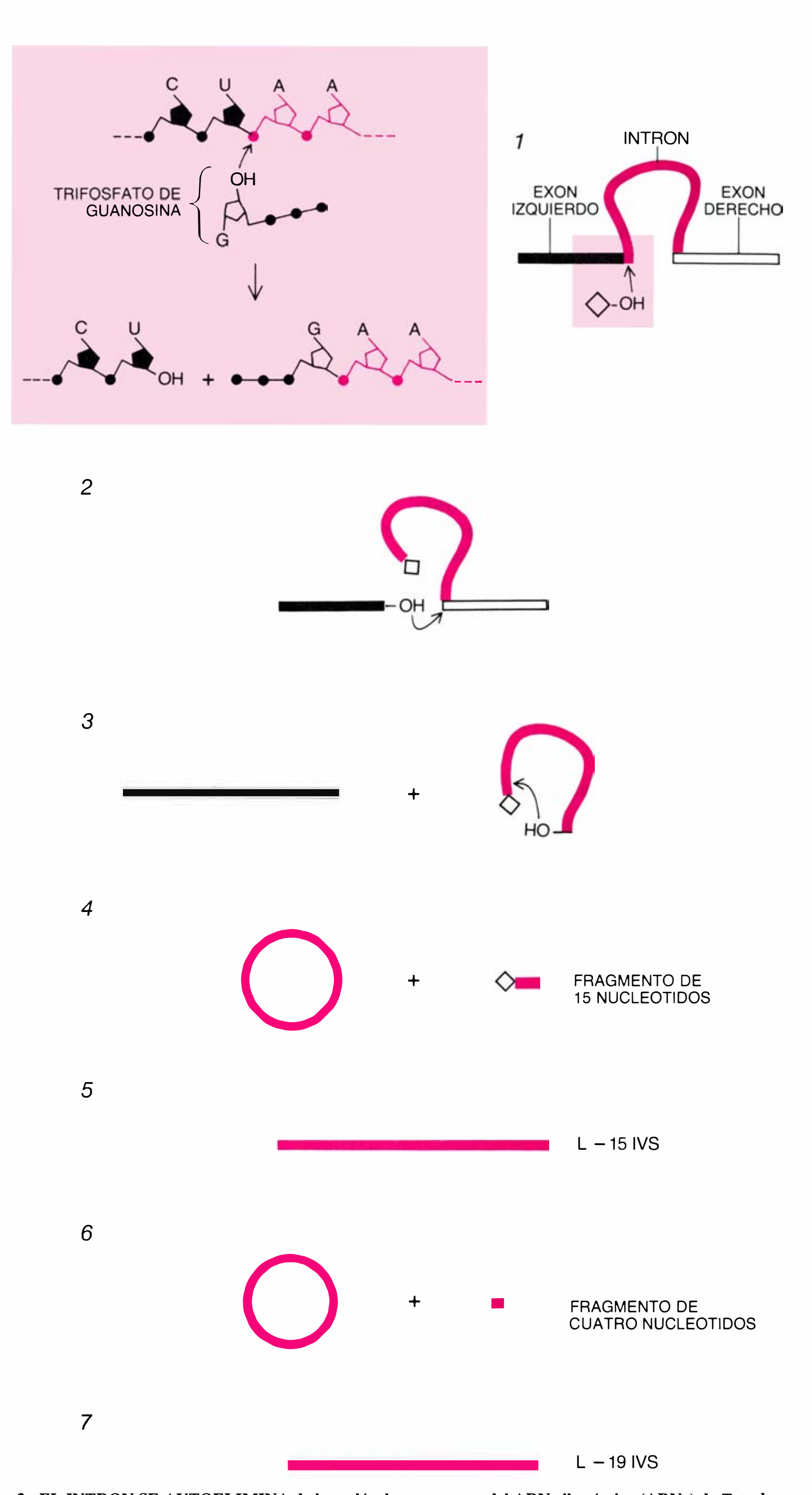
si la reacción de empalme exigía una fuente de energía externa. Resultó que para que se produjera la reacción eran necesarias algunas moléculas pequeñas, fundamentalmente el ion magnesio y algunas de las diferentes formas del nucleósido guanosina. Sin embargo, para nuestra sorpresa, no se precisaba el extracto celular que contenía las enzimas.

## ¿Es el ARN una enzima?

Nos vimos obligados a concluir que o bien la actividad enzimática procedía de una proteína que estaba tan fuertemente unida al ARN que éramos incapaces de separarla, o que el ARN estaba catalizando su propio procesamiento. Pero la idea de que todos los catalizadores biológicos eran proteínas estaba profundamente arraigada y no era nada fácil aceptar la hipótesis de catálisis por un ARN. Muy pronto nos encontramos con otro ejemplo aparente de catálisis por ARN en unos experimentos llevados a cabo por Paula J. Grabowski, que por aquel entonces preparaba su doctorado en mi laboratorio. Paula descubrió que el intrón de *Tetrahymena* existía también en forma circular y que la molécula lineal se podía convertir en circular incubándola en una solución que contenía el ion magnesio, sin ningún tipo de enzima.

Una vez más, parecía que la reacción era independiente de las proteínas y, por tanto, de cualquier enzima, al menos de acuerdo con la definición de enzima que prevalecía en 1981. No podíamos excluir por completo todavía que hubiera una proteína enzimática escondida en alguna parte del sistema experimental. El ARN que se utilizó en nuestro trabajo se preparó a partir de un crudo de núcleos aislados de *Tetrahymena*. Quedaba la posibilidad de que una proteína nuclear insólitamente fuerte se hubiera pegado al ARN y fuera la responsable de la eliminación del intrón, convirtiéndolo a continuación en un anillo.

Esa posibilidad se descartó luego de una serie de experimentos; entre ellos destacaba uno que implicaba la síntesis, a partir de un molde de ADN recombinante, de un transcrito pre-ARNr truncado. Este sistema era enteramente artificial: el ADN creció en *E. coli*, se purificó después y se transcribió a ARN por la acción de enzimas puras de *E. coli*, que posteriormente fueron eliminadas de la solución. El ARN resultante no había estado nunca próximo a una célula y, por consiguiente, no podía estar contaminado




**3. EL INTRON SE AUTOELIMINA de la molécula precursora del ARN ribosómico (ARNr) de *Tetrahymena* sin la ayuda de proteínas enzimáticas. Una molécula de guanosina libre o de trifosfato de guanosina (*rombos*) desencadena la cascada de reacciones que se produce durante la eliminación del intrón. Un grupo hidroxilo (OH) unido al nucleótido "ataca" al grupo fosfato del extremo 5′ del intrón (*1*). Se rompe el enlace fosfodiéster entre el intrón y el exón de la izquierda, y se forma un nuevo enlace entre la guanosina y el intrón (*encuadre*). Se libera un grupo hidroxilo nuevo en el extremo del exón de la izquierda que comienza el ataque sobre el extemo 3′ del intrón (*2*). Se unen los exones y se libera el intrón (*3*). Una reacción semejante hace que el intrón forme un anillo, eliminando 15 nucleótidos de su extremo durante el proceso (*4*). El anillo se abre tomando una forma lineal (*5*) y torna a cerrarse perdiendo cuatro nucleótidos (*6*). Se vuelve a abrir, en una forma lineal que se conoce como L−19 IVS: secuencia intercalada lineal menos 19 nucleótidos (*7*).**

con enzimas de procesamiento. A pesar de todo, el ARN eliminaba su propio intrón y, además, el empalme se realizaba en los mismos puntos que en la célula intacta, puntos que habían sido definidos por Joseph G. Gall y sus colegas, de la Universidad de Yale. No cabía ninguna duda: el intrón de *Tetrahymena* se autoeliminaba.

La reacción de autoprocesamiento nos evocó, de inmediato, la acción de una enzima. Las reacciones se producían a velocidades superiores en muchos órdenes de magnitud. Eran muy específicas. Además, cuando se colocaba el ARN en una solución que inhibía su plegamiento, perdía la capacidad de autoprocesarse. Este resultado mostraba que la estructura tridimensional de la cadena polinucleotídica era esencial para la actividad; lo mismo sucede con la actividad de una enzima, que requiere el plegamiento específico de una cadena de aminoácidos. Pero, a diferencia de las enzimas, el ARN actuaba sobre sí mismo; para dar fe de esa discrepancia acuñamos el término ribozima.

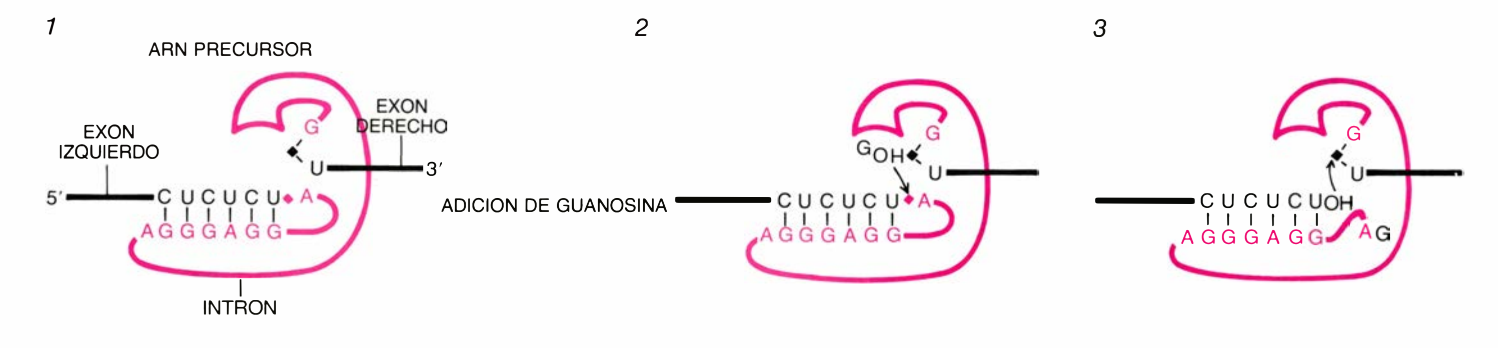
## Una cascada catalítica

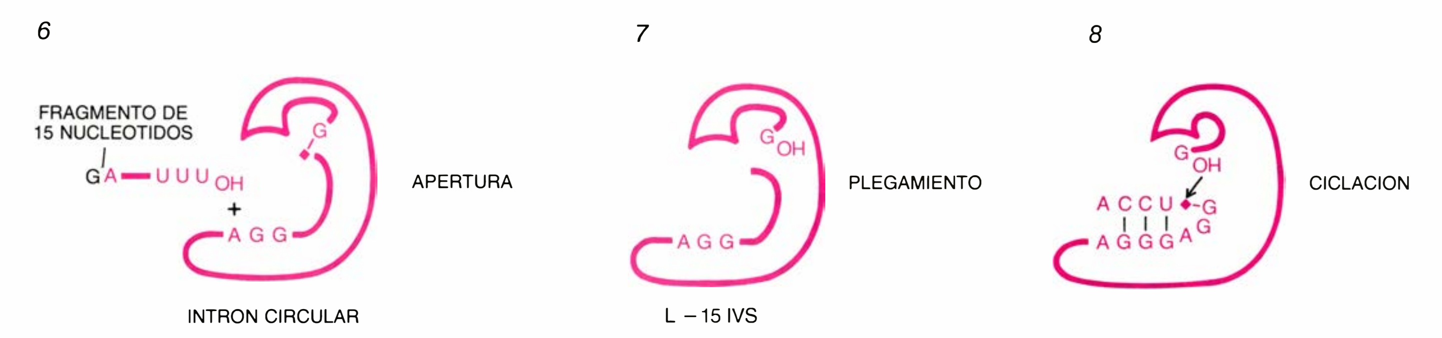
El auto-empalme de ARN resultó ser sólo un paso más de una cascada de reacciones que realizaba el ARN de *Tetrahymena* sobre sí mismo. Eliminado el intrón, éste se convertía inmediatamente en la forma circular que descubrió Grabowski. Durante el proceso de auto-ciclación, el intrón, que inicialmente tenía 414 nucleótidos, perdía un tramo de 15 nucleótidos. Después de un breve intervalo de tiempo, volvíase a abrir adquiriendo una forma lineal. La molécula lineal formaba, a continuación, un segundo anillo, perdiendo esta vez cuatro nucleótidos. El círculo tornaba a abrirse de nuevo originando una molécula lineal, a la que se bautizó con el anagrama de L−19 IVS: secuencia intercalada lineal menos 19 nucleótidos.

¿Cómo produce el intrón todos estos cambios? Las primeras pistas las obtuvimos muy pronto, antes incluso de que probásemos que la reacción estaba autocatalizada. Comenzamos por observar que, para que se produjera el empalme, era necesaria la presencia de una guanosina. Zaug analizó la secuencia de nucleótidos del intrón y comprobó que empezaba por una guanosina que no estaba codificada en el ADN. Parecía que la reacción de empalme requería guanosina, no como fuente de energía, sino como un monómero a agregar. Para comprobar esta posibilidad mezclé GTP (trifosfato de guanosina, una fuente de energía que se emplea en muchas reacciones celulares) marcado radiactivamente con pre-ARNr sin marcar. El GTP no fue utilizado por su energía, sino que, una vez acabado el empalme, el GTP radiactivo aparecía en un extremo del intrón.

¿Qué papel desempeñaba entonces la guanosina en la reacción del empalme? Nosotros avanzamos que el GTP (o cualquiera de las otras formas de guanosina, que funcionan con idéntica eficacia) actuaba de "grupo atacante" que ayudaba a romper la cadena de ARN en el lugar correcto. La rotura de una cadena de ARN exigía la rotura de su esqueleto, constituido por dos clases de moléculas distribuidas en forma alternante: grupos fosfato y un azúcar de cinco átomos de carbono. (Las bases nitrogenadas que varían entre nucleótidos, codificando así la información genética, están unidas al esqueleto: una base por cada azúcar.) La unión entre el grupo fosfato y el azúcar —enlace fosfodiéster— tenía que romperse para que se fragmentara la cadena de ARN. La guanosina inicia la reacción de auto-empalme atacando el enlace en un extremo del intrón.

Partiendo de lo que habíamos averiguado acerca del ataque de la guanosina, seguimos empeñados en conocer el esquema de las reacciones de




**4. DIVERSAS ESTRATEGIAS CATALITICAS ayudan en los cambios de enlace fosfodiéster del intrón de *Tetrahymena*. La secuencia *GGAGGG* (que, por convención, se escribe en la dirección 5′-3′) situada cerca del extremo del intrón se une a la secuencia *CUCUCU* localizada en el extremo del exón izquierdo (*1*). Se activa el grupo fosfato del extremo 5′ del intrón (*rombo de color*). Al añadir guanosina, el intrón la incorpora en una posición que favorece su ataque sobre el enlace fosfodiéster activado (*2*). Roto el enlace, el fosfato del otro extremo del intrón, también activado (*rombo negro*), es atacado por el grupo hidroxilo unido**

corte y empalme en su conjunto. El proceso comienza cuando una molécula de guanosina libre (o GTP) se encuentra con el ARN intrón y queda atrapada temporalmente en una hendidura molecular llamada lugar de unión, formado por una parte del intrón. El lugar de unión sitúa un grupo hidroxilo (OH) de la guanosina en una posición favorable para atacar el grupo fosfato en el punto de unión entre el exón y el extremo 5′ del intrón. (Cada enlace fosfodiéster se extiende desde el carbono 5′ de un azúcar hasta el carbono 3′ del siguiente, lo que explica el carácter direccional de la cadena de ARN: un extremo es 5′ y el otro 3′.)

Al mismo tiempo, un segundo punto de unión mantiene el extremo del exón, exponiendo la unión fosfato al ataque de la guanosina. Aunque no se conoce todavía la estructura precisa del lugar de unión de la guanosina, sí se ha identificado el lugar de unión del extremo del exón. Este resulta ser un tramo de nucleótidos del intrón que presenta la secuencia *GGAGGG*. Los seis nucleótidos se aparean con un tramo de seis pirimidinas (*CUCUCU*) del extremo 5′ del exón. (Las bases nitrogenadas del ARN son de dos formas: purinas, *A* y *G*, y pirimidinas, *C* y *U*.) Atrapando simultáneamente las seis pirimidinas y la guanosina, el intrón coloca los reactivos en la posición adecuada para que pueda comenzar el ataque de la guanosina.

El punto de ataque de la guanosina es el enlace entre la *U* final del tramo de pirimidinas y el nucleótido adyacente, que es una *A*. La guanosina rompe la unión *U-A* y se inserta entre ambos originando una nueva unión entre ella misma y la *A*. Este intercambio de enlaces fosfodiéster constituye la reacción de transesterificación. Conforme la guanosina se va agregando al extremo del intrón, el extremo 3′ del exón terminado en *U* queda colgando libre. La *U* pende sólo por un momento. Rápidamente se produce una segunda transesterificación que une los exones, eliminando el intrón. Una tercera reacción de este tipo convierte el intrón en un anillo y, después de abrirse éste de nuevo, una cuarta reacción vuelve a crear otra forma circular ligeramente menor.

## Estrategias de la ribozima

Tratando de estudiar los mecanismos del proceso de auto-empalme (en colaboración con mis colegas, de los que citaré a Brenda L. Bass, Francis X. Sullivan, Tan Inoue y Michael D. Been) se acentuó aún más la semejanza que existía entre la ribozima y una enzima. Entre las estrategias catalíticas de las enzimas se conoce la de unir dos sustratos (reactivos) cercanos y con una orientación especial entre sí, facilitando, por consiguiente, la reacción de los mismos. El ARN intrón recurre a la misma táctica cuando engarza la guanosina y las seis pirimidinas.

Las semejanzas no terminan ahí. Sabemos que la estructura plegada del intrón es esencial para su actividad, como lo es la forma tridimensional de una proteína. Esa relevancia del plegamiento débese a que crea el lugar de unión de la guanosina y del tramo de pirimidinas. Según se iban revelando los detalles del mecanismo de interacción, fuimos comprobando que la estructura plegada del intrón activaba también el grupo fosfato de cada lugar de reacción, dejándolo en un estado favorable para la ruptura. A esta conclusión se llegó por la observación de que, incluso en ausencia de guanosina, el intrón experimentaba una lenta reacción de ruptura en el lugar de empalme 3′ y —en menor grado— también en el extremo de empalme 5′. Los iones hidroxilo en solución actúan como grupo atacante en ausencia de guanosina.

La ruptura sin guanosina procede más lentamente que con guanosina. Eso no debe sorprendernos, puesto que el ion hidroxilo no puede lograr la interacción que prepara a la guanosina para el ataque óptimo. Lo significativo es que, incluso sin guanosina, se produce el corte en los mismos puntos que en las reacciones de corte y empalme completas. La estructura plegada del intrón favorece el corte del ARN en los puntos precisos originando los extremos del intrón suprimido. Los cortes se dan en esos puntos, aun cuando falte el agente atacante que actúa en la reacción biológica (guanosina).

Si bien es cierto que ignoramos el mecanismo a través del cual el plegamiento activa los fosfatos en los puntos de corte, no podemos dejar de apreciar la notable eficacia de la estrategia de activación. El ARN es, por lo común, bastante estable; sus enlaces fosfodiéster se rompen muy despacio en ausencia de catalizador. La estructura plegada del intrón acelera la velocidad de ruptura en los puntos de corte y empalme en un factor de 10.000 millones. Dicho de otra manera: la estructura plegada reduce el tiempo de reacción de 19.000 años a un minuto.

**al exón izquierdo (*3*). Se unen los exones y se libera el intrón (*4*). Se repliega entonces el intrón de forma que la secuencia *UUU* cercana a su extremo 5′ se coloca para ser atacada por la guanosina de su extremo 3′ (*5*). Los 15 nucleótidos que se pierden al cerrarse el bucle son los anteriores al fosfato activado en el punto de ataque (*6*). Posteriormente, el círculo se abre (*7*), se vuelve a reciclar (*8, 9*) y se abre de nuevo (*10*).**

## ¿Cuál es la estructura central?

¿Qué tiene la configuración plegada para poder producir un efecto tan potente? Las respuestas que daremos se

fundan en observaciones que están muy lejos de las relaciones entre el ARN de *Tetrahymena* y moléculas similares de otras muchas especies. Las otras especies entraron en escena porque hacia 1982 se estaba empezando a elaborar un esquema de clasificación de las reacciones de corte y empalme del ARN. En un comienzo, el esquema era una sencilla clasificación de distintos ARN de acuerdo con el criterio de semejanzas en la secuencia nucleotídica de sus intrones. La clasificación incluía cuatro grupos. Uno estaba formado por transcritos que se procesaban en el núcleo para constituir los ARNt. Un segundo grupo estaba compuesto por moléculas, que también se procesaban en el núcleo y originan los ARNm.

Las otras categorías —denominadas Grupo I y Grupo II— comprendían ARN de fuentes muy diversas. El Grupo I abarcaba un muestrario de intrones de ARNr, ARNm y ARNt que proceden en su mayoría de mitocondrias y cloroplastos (orgánulos citoplasmáticos que contienen su propio ADN, ARN y ribosomas). Se ha identificado unos 30 intrones del Grupo I (puede que haya muchos más) que proceden de especies que van desde protistas hasta hongos y plantas superiores, como maíz y judías, pero no incluyen especies animales. Los ARN del Grupo II, que proceden fundamentalmente de mitocondrias de hongos y de cloroplastos de plantas, parece que son menos comunes.

Los intrones del Grupo I se definieron en un principio como intrones mitocondriales de hongos que tenían cuatro secuencias de nucleótidos en común, cada una de las cuales con una decena de nucleótidos. Muy pronto quedó claro que esas secuencias manifestaban una estrecha relación con el modo de acción de los intrones del Grupo I y, en particular, con la forma tridimensional que servía de base para el empalme. La primera pista de la relación entre secuencia y función apareció en 1982, cuando varios grupos de investigación descubrieron que el intrón de *Tetrahymena*, una molécula nuclear, compartía los mismos elementos secuenciales conservados.

Constituyó una gran sorpresa hallar secuencias comunes, pues los ARN en cuestión procedían de fuentes muy dispares. (Nadie cree que los hongos y los protozoos estén emparentados; por otro lado, los ácidos nucleicos mitocondriales suelen diferir bastante de sus equivalentes nucleares.) La conservación de una secuencia de nucleótidos a través de una amplia gama de especies implica a menudo que la secuencia ejerce un papel funcional significativo, que debe mantenerse ante la divergencia evolutiva. Tomando en consideración cuanto se sabía acerca del intrón de *Tetrahymena*, parecía razonable pensar que el papel de las secuencias conservadas en el Grupo I de intrones radicaba en la formación de la estructura tridimensional que dirigía la reacción de auto-empalme.

## Modelos de la estructura central

De diversas fuentes salieron ideas en torno a la naturaleza de la estructura central; ante el acuerdo que mostraban se hicieron acreedoras de cierta confianza en su validez. François Michel y Bernard Dujon, del Centro de Genética Molecular de Gif-sur-Yvette, Francia, y R. Wayne Davies y sus colegas, de la Universidad Victoria de Manchester, propusieron independientemente que las secuencias conservadas favorecían el plegamiento de los intrones del Grupo I en estructuras tridimensionales que son similares, por lo menos en una región central.

Las secuencias comunes determinan la estructura central a través de la unión entre sí. Entre los cuatro nucleótidos del ARN, dos pares (*A* y *U*; *C* y *G*) son complementarios, particularmente aptos para formar el enlace químico débil conocido como puente de hidrógeno. Los puentes de hidrógeno entre los nucleótidos complementarios proporcionan la razón del apareamiento de las dos hebras del ADN y, de forma similar, dos tramos de ARN pueden constituir una región helicoidal si constan de nucleótidos complementarios. Las secuencias conservadas, apareándose entre sí, pueden determinar que el intrón se pliegue en una forma particular; esto es lo que propusieron Michel y Davies después de analizar las secuencias de nucleótidos.

Al mismo tiempo, nuestro grupo de trabajo estaba abordando el problema desde una perspectiva bioquímica, algo distinta. Combinando los datos estructurales obtenidos por N. Kyle Tanner, alumno de doctorado de nuestro laboratorio, con un programa de ordenador desarrollado por Michael Zuker, del Consejo Nacional de Investigación de Canadá, ideamos un modelo para la estructura del intrón. Nuestro modelo coincidía casi perfectamente con los de Michel y Davies. La correspondencia nos tranquilizaba en punto a la corrección de los modelos y, probablemente, la configuración que definían intervenía de manera directa en el auto-empalme.

Otro dato abonaba la veracidad de la hipótesis. Trabajando sobre la expresión génica mitocondrial de levadura se encontró un tipo de mutaciones (cambios en la secuencia de nucleótidos de un gen) que alteraban las breves secuencias conservadas de los intrones del Grupo I y evitaban la reacción de corte y empalme en las células vivas. Más recientemente, nosotros y el grupo de Davies fragmentamos las secuencias conservadas del intrón de *Tetrahymena* y descubrimos que el proceso de auto-empalme quedaba inhibido. Estos estudios significaban claramente que las secuencias comunes primaban una conformación que favorecía la acción ca-

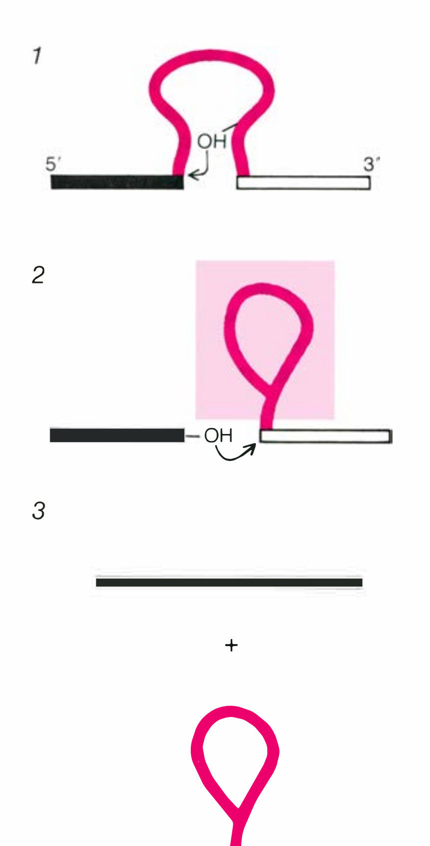
**5. IMPORTANCIA DEL APAREAMIENTO DE BASES para la actividad catalítica del intrón de *Tetrahymena*; quedó demostrada en unos experimentos en los que se eliminó la capacidad del intrón para formar regiones de doble hebra. Entre las secuencias que desempeñan un papel particularmente significativo en la determinación de la estructura plegada de la región central del intrón (*mostradas en la figura 1*) se encuentran de nucleótidos y evitan el apareamiento normal (como lo realizó recientemente el autor en colaboración con *2* y forman una región de doble hebra. Si se introducen mutaciones en *9L* o en *2* que cambian la secuencia de nucleótidos y evitan el apareamiento normal (como lo realizó recientemente el autor en colaboración con John M. Burke y sus colegas, del Williams College), el intrón pierde su capacidad de autoeliminarse del precursor del ARNr. Al combinarse los dos grupos de mutaciones, se restablece el apareamiento y la capacidad catalítica del intrón. El significado funcional de las secuencias *9R'*, *A*, *B*, *9L* y *2* queda acentuado por el hecho de que se han conservado a lo largo de la evolución en todos los intrones relacionados con el pre-ARNr de *Tetrahymena*, constituyendo una categoría llamada Grupo I. (Dibujos de Thomas C. Moore.)**

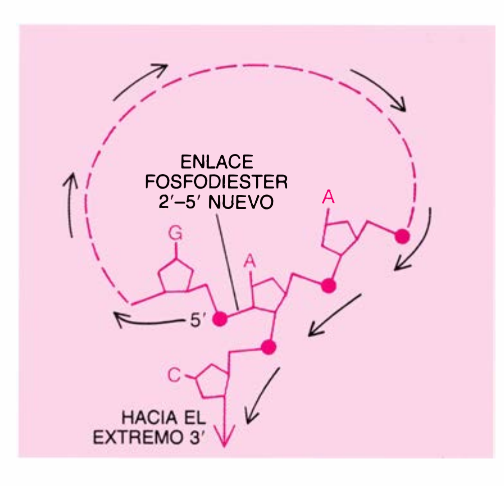
talizadora de los intrones. Hay todavía cuestiones muy importantes por resolver y se está tratando de conocer toda la estructura tridimensional en sus pormenores. Quizá se pueda aclarar muy pronto de qué manera la configuración plegada permite acercar los sustratos correctos e inducir su reacción.

Conforme se profundizaba en la relación entre la estructura central y el auto-procesamiento, varios descubrimientos combinados mostraron que el intrón de *Tetrahymena* estaba muy lejos de ser un caso único. Esto, que resultó tranquilizador porque ayudó a convencernos de que nuestros descubrimientos eran correctos, no encerraba ninguna sorpresa especial. Después de todo, si el intrón de *Tetrahymena* y los intrones mitocondriales del Grupo I presentaban una estructura similar, y esa estructura era necesaria para el auto-procesamiento, cabía esperar que los intrones del Grupo I poseyeran también la capacidad de auto-procesamiento.

Esperanza que confirmaron varios grupos de investigadores. Gian Garriga y Alan Lambowitz, de la Universidad de St. Louis, demostraron que un intrón de un ARNm mitocondrial de *Neurospora crassa* se auto-procesaba. Henk Tabak y sus colegas, de la Universidad de Amsterdam, encontraron varios intrones de ARNm y ARNr de mitocondrias de levadura que se auto-empalmaban. En todos los casos se impone la presencia de guanosina y el ARN se empalma por el mismo mecanismo que en *Tetrahymena*. Y lo que debe subrayarse, se halló después un ARN de un virus bacteriano —un objeto biológico de una categoría diferente— que realizaba la misma proeza. Marlene Belfort, Frank Maley y sus colaboradores, del Departamento de la Salud del estado de Nueva York en Albany, encontraron que un ARN del bacteriófago *T4* se auto-procesaba en *E. coli*.

El descubrimiento de Belfort y Maley generalizaba el mecanismo del Grupo I desde los virus bacterianos hasta los organismos superiores. Nuevos descubrimientos extendieron el proceso de auto-empalme a una nueva categoría en conjunto: los intrones del Grupo II. Craig L. Peebles, de la Universidad de Pittsburgh, junto con Philip S. Perlman, de la Universidad estatal de Ohio, y Leslie Grivell y sus colegas, de la Universidad de Amsterdam, han dado a conocer el descubrimiento de un precursor de un ARNm mitocondrial del Grupo II que puede eliminar su propio intrón. El mecanismo de auto-procesamiento del Grupo II no es el mismo que el de las moléculas del Grupo I. Por un lado, no necesita guanosina, ni siquiera ningún nucleótido libre. Es más, el proceso conlleva la formación de una estructura intermedia no encontrada en el intrón de *Tetrahymena* ni en sus parientes del Grupo I: el lazo.




**6. LLAMAMOS LAZO al bucle formado por un tipo de intrones —denominados Grupo II— al ser eliminados de sus moléculas de ARN. Algunos de los intrones del Grupo II se autoengarzan, pero su procesamiento no requiere guanosina. En su lugar, alguno de los muchos grupos hidroxilo en *2′* del intrón ataca el lugar de engarce en 5′ (*1*). La reacción siguiente enlaza el extremo 5′ del intrón a un punto situado a una corta distancia del extremo 3′, originando una estructura ramificada con un bucle: el lazo (*2*). La ramificación se logra mediante la formación de un enlace fosfodiéster 2′-5′ nuevo que hace que un nucleótido de adenosina establezca un enlace fosfodiéster con tres nucleótidos en vez de con los dos habituales (*recuadro*). La unión de los exones libera el lazo del resto del ácido ribonucleico (*3*).**

El lazo es un bucle de ARN formado por el intrón al escindirse de un transcrito de ARN precursor. El bucle no está formado por la unión de los dos extremos del intrón, sino que uno de los extremos se une a un nucleótido que se halla situado a breve distancia del otro extremo del intrón, dejando un cabo de ARN que se extiende más allá del bucle. La estructura que se origina de esta forma tiene cierto parecido con la cuerda que enarbolan girando con rapidez los vaqueros, de ahí el nombre de lazo.

Llamó la atención que el lazo encontrado en el proceso de corte y empalme del Grupo II se había observado ya como un producto del procesamiento del pre-ARNm nuclear. Este procesamiento requería la presencia de proteínas, y siempre se había supuesto que el corte y empalme de los pre-ARNm nucleares se realizaba por proteínas enzimáticas en vez de por un mecanismo de auto-corte-empalme. Sin embargo, el descubrimiento del lazo en los intrones auto-procesados del Grupo II sugería que las ribozimas intervenían probablemente en el corte y empalme de los mensajeros nucleares. Más aún, los intrones del Grupo II podrían representar el eslabón de la evolución entre los pre-ARNm nucleares y los ARN del Grupo I que se auto-procesan.

## Catálisis auténtica

Aunque ya se había establecido por entonces que el ARN auto-procesado tenía muchas propiedades similares a las enzimas, persistía una diferencia que los seguía separando: la ribozima actuaba sobre sí misma, no sobre otra molécula. Por alterarse a sí misma en el curso de la reacción de corte y empalme, no podía considerarse un catalizador en el más estricto sentido de la palabra. Para algunos investigadores, esa nota discriminante entre ribozimas y enzimas las colocaba en dos categorías diferentes. Sólo dos años después del descubrimiento del proceso de auto-empalme desapareció incluso esa distinción.

En 1983 Sidney Altman y sus colaboradores, de la Universidad de Yale, trabajaban en equipo con el grupo de Norman R. Pace, del Hospital Nacional Judío en Denver, en un proyecto para analizar la acción de la ribonucleasa *P*. Se trata de una enzima que procesa el ARNt y que se ha encontrado tanto en bacterias como en células superiores; su rareza se debe a

que contiene ARN y proteína. Altman y otros habían mostrado ya que, en condiciones celulares, el ARN y la proteína eran necesarios para que la nucleasa realizara su función de cortar el ARN precursor en un lugar específico. Sin embargo, Altman y Pace observaron que, cuando la reacción se desarrollaba en un tubo de ensayo, la subunidad de ARN sola podía cortar la molécula de pre-ARNt en el lugar correcto, mientras que la proteína no presentaba dicha capacidad.

A principios del año siguiente, Altman publicó la prueba final de que el componente de ARN de la ribonucleasa *P* era la subunidad catalítica. Se utilizó un molde de ADN recombinante para transcribir la subunidad de ARN de la ribonucleasa; se demostró que el ARN sintetizado a partir del molde podía catalizar la maduración de los precursores del ARNt en el lugar preciso. Una vez eliminada la posibilidad de que la catálisis debiérase a proteína contaminante, este experimento probó que —por lo menos en el tubo de ensayo— la subunidad de ARN operaba como una enzima en el más estricto sentido de la palabra. Probablemente, la proteína, que carece de actividad catalítica por sí misma, facilita que el ARN funcione bajo las condiciones reinantes en la célula viva.

Recientemente, Zaug y yo hallamos una forma acortada del intrón de *Tetrahymena* que mostraba idéntica capacidad de actuar como una enzima genuina. El experimento que condujo a esta conclusión se diseñó pensando en el mecanismo que induce la conversión del intrón en un anillo. Las dos reacciones de ciclación del intrón presentan la misma forma general: el extremo 5′ del intrón se une y se acorta, mientras que una reacción de transesterificación une el resto del intrón en un bucle. Esta reacción es, en esencia, idéntica a la que lleva a la eliminación del intrón; como en la eliminación, el ARN que se separa ha de contener un tramo de pirimidinas para que pueda asirse al lugar de unión.

Después de que el intrón se ha ciclado dos veces no puede transformarse ya en anillo, por la sencilla razón de que los 19 nucleótidos eliminados del extremo 5′ portan el único tramo de pirimidinas disponible para la unión. Sin embargo, la molécula acortada no ha perdido su actividad catalítica, y consideramos que si se le suministraba un nuevo sustrato al intrón truncado —el L−19 IVS—, éste se comportaría como una enzima auténtica.

Eso fue exactamente lo que sucedió cuando Zaug proporcionó un tramo corto de pirimidinas —de *C* en este caso— a L−19 IVS. Vio que el intrón cortaba y engarzaba la cadena de pirimidinas igual que corta y vuelve a unirse a sí mismo cuando en el extremo 5′ están las secuencias adecuadas. El L−19 IVS permanecía intacto después de cada serie de reacciones, listo para cortar y volver a unir otro tramo de pirimidinas. Satisfacía, pues, la definición de catalizador.

Aunque habíamos predicho la actividad enzimática del intrón acortado, nos dejó asombrados su "calidad funcional". El L−19 IVS cortaba y empalmaba la cadena de *C* unas 100 veces por hora. A pesar de que la reacción enzimática verdadera requiere que las dos moléculas separadas se encuentren para que puedan reaccionar, cada reacción se produce con la misma rapidez que la reacción de auto-corte y empalme.

## El ARN puede ensamblar ARN

Quedaba todavía otra sorpresa. El corte y empalme repetido alargaba el tramo de pirimidinas: el L−19 IVS estaba sintetizando un polímero de *C*. Este descubrimiento encerraba muchas implicaciones, pues la polimerización del ARN constituye uno de los requisitos previos para la duplicación de los genes de ARN, por mucho tiempo considerado algo fundamental para el origen de la vida. Para algunos, el descubrimiento de la reacción de auto-procesamiento y de la actividad enzimática de la ribonucleasa *P* resolvía, en favor del ARN, el problema del huevo y la gallina del origen de la evolución (qué fue primero, si la proteína o los ácidos nucleicos). El descubrimiento de que el intrón de *Tetrahymena* gozaba de una capacidad elemental para sintetizar ARN ha traído esa conclusión a un primer plano. Muestra que el ARN puede, por lo menos en principio, catalizar su propia replicación. Parece razonable, pues, imaginar que el primer paso hacia el origen de la vida fue la replicación del ARN sin la ayuda de ninguna proteína funcional.

Tras haber divagado por el pasado prebiótico, resulta divertido mirar hacia el futuro y especular de dónde vendrán los próximos ejemplos de catálisis por ARN. En todos los casos conocidos, el sustrato del ARN enzimático es ARN: otra parte de la misma molécula, un polímero de ARN diferente o un único nucleótido. Probablemente, no se trata de ninguna casualidad. El ARN está perfectamente preparado para su interacción con otros ARN, pero es más difícil imaginarse un ARN formando un buen centro activo con otras moléculas biológicamente signi-

**7. GENUINA ACTIVIDAD ENZIMATICA de un intrón: cataliza la acción sobre otra molécula. Dicha función se demostró por primera vez con el ARN de *Tetrahymena* L−19 IVS. El intrón-enzima carece de la secuencia cercana al extremo 5′ que suele estar unida a la secuencia (*GGAGGG*) y por consiguiente expuesta al ataque de la guanosina del extremo 3′ del intrón. Sin embargo, el lugar de unión sigue estando presente (*1*), por lo que puede unirse a otras moléculas con secuencia complementaria, como una cadena de cinco citosinas (*2*). La reacción siguiente une la *C* final a la guanosina del extremo 3′ del intrón (*3*). Como hay otras cadenas de citosina presentes, una de ellas se une al intrón y comienza un ataque sobre el enlace entre la citosina y la guanosina (*4*). De ello surge una cadena de seis *C* que puede actuar de sustrato para la adición de otra citosina (no mostrada). Con este método se ha llegado a sintetizar cadenas de hasta 30 nucleótidos.**

ficativas, como los aminoácidos o los ácidos grasos. De ahí que me incline a esperar que los próximos ejemplos de catálisis por ARN tengan también ARN de sustrato.

Hay dos posibilidades. En una de ellas se apela a las partículas ribonucleoproteicas nucleares pequeñas (PRNnp o, como se las denomina frecuentemente, “snurps”, de sus siglas en inglés); son necesarias en muchas operaciones de corte y empalme de ARN en el núcleo, incluido el procesamiento de pre-ARNm. Cada *snurp* consta de un ARN y de varias proteínas. Es posible que los *snurps* señalen sólo, sobre las moléculas precursoras de ARNm, los lugares donde las proteínas enzimáticas tradicionales cortan y empalman, pero yo sospecho que desempeñan un papel más directo en la catálisis.

La otra posibilidad tiene que ver con el ribosoma. Además de los ARNr, ese orgánulo aloja 55 o más proteínas. Algunos de los sustratos con los que interactúa el ribosoma son también ARN, específicamente el ARNm y el ARNt. Las investigaciones de muchos laboratorios —principalmente en el de Carl R. Woese, de la Universidad de Illinois en Urbana-Champaign, y en el de Harry F. Noller, Jr., de la Universidad de California en Santa Cruz— han mostrado que, a lo largo de la evolución, se ha conservado rigurosamente la estructura de los ARNr. Sus trabajos, junto con el descubrimiento de mutaciones en el ARNr que afectan a la síntesis de las proteínas, pueden indicar que el ARN ribosómico desarrolla una acción catalítica directa en la síntesis de proteínas.

## Doble capacidad

La conclusión de que la síntesis de proteínas, una actividad biosintética fundamental, está catalizada por ARN asestaría el golpe final a la creencia de que todas las funciones celulares residen en las proteínas. Cabe, por supuesto, que no sea así; el ribosoma podría constituir un agregado de proteína y ácido nucleico tan imbricado que su actividad catalítica no deba asignarse exclusivamente a cualquiera de los componentes. Podamos o no atribuir al ARN la actividad sintética de los ribosomas, lo cierto es que en los últimos cinco años se ha producido un cambio fundamental en la bioquímica. Ha quedado claro que, al menos en algunos casos, la capacidad de contener información y la capacidad catalítica residen en la misma molécula: ARN. Apenas estamos empezando a desentrañar las implicaciones de esa duplicidad.

# El bosón de Higgs

*La teoría que describe las interacciones entre partículas elementales podría aportar rigor matemático al modelo estándar de las fuerzas fundamentales. La búsqueda de esa partícula huidiza requerirá nuevos aceleradores*

Martinus J.G. Veltman

Los problemas verdaderamente fundamentales de la física siempre pueden explicarse en términos sencillos sin la ayuda de ecuaciones o argumentos matemáticos complicados. Al menos eso me contó una vez Victor F. Weisskopf, físico eminente, propenso a ese tipo de explicaciones, y quizás ande en lo cierto. Eso es verdad en el caso de una partícula cuya existencia se ha predicho, aunque no se ha encontrado todavía: me refiero al bosón de Higgs; también lo es para el campo de Higgs, asociado a la misma. El bosón de Higgs, así llamado en honor de Peter W. Higgs, de la Universidad de Edinburgh, es el principal ausente del modelo estándar de los procesos elementales: la teoría más aceptada sobre los constituyentes últimos de la materia y las fuerzas fundamentales mediante las cuales interactúan. Según el modelo estándar, toda la materia está formada por quarks y leptones que interactúan entre sí mediante cuatro fuerzas: la gravedad, el electromagnetismo, la fuerza débil y la fuerza fuerte. La fuerza fuerte liga los quarks entre sí para formar protones y neutrones; la fuerza fuerte residual mantiene unidos a protones y neutrones en los núcleos. La fuerza electromagnética liga los núcleos y los electrones, que son una clase de leptones, formando los átomos; la fuerza electromagnética residual une los átomos constituyendo moléculas. La fuerza débil es responsable de ciertas clases de desintegración nuclear. La influencia de ambas fuerzas, débil y fuerte, sólo se deja sentir a cortas distancias: su limitado alcance no supera el radio de un núcleo atómico. La gravedad y el electromagnetismo tienen un alcance ilimitado, por cuya razón nos resultan más familiares.

A pesar de cuanto se ha avanzado en el conocimiento del modelo estándar, hay motivos para pensar que es incompleto. Aquí es donde aparece el bosón de Higgs. En concreto, se cree que dicho bosón confiere rigor matemático al modelo estándar, generalizando su aplicación a energías más altas que las conseguidas por la generación actual de aceleradores de partículas, que podrán alcanzarse pronto, sin embargo, en los futuros aceleradores. Se supone, además, que el bosón de Higgs genera las masas de todas las partículas fundamentales; podríamos decir que las partículas "se comen" al bosón de Higgs para ganar peso.

El mayor problema que dicha partícula viene planteando hasta ahora es que no se ha encontrado ninguna prueba de su existencia. Pero sí contamos ya con bastantes indicaciones indirectas que sugieren que la huidiza partícula no existe. Lo cierto es que la física teórica está constantemente llenando el vacío con tantos fantasmas del tenor del bosón de Higgs que parece imposible que alguien pueda ver siquiera las estrellas en una noche clara. Aunque los futuros aceleradores llegaran a encontrar una prueba directa del bosón de Higgs y demostraran que los motivos para postular su existencia eran correctos, pienso que las cosas no serán tan sencillas. Debo aclarar de inmediato que esto no significa que todo el modelo estándar esté equivocado, sino que el modelo estándar probablemente es sólo una aproximación –aunque muy buena– de la realidad.

Aun cuando la única razón legítima para introducir el bosón de Higgs sea aportar rigor matemático al modelo estándar, se ha prestado mucha atención a la propuesta, conceptualmente más fácil, de que la partícula genera las masas de todas las partículas elementales. Empezaré, pues, con este tema.

Si queremos entender la manera en que el bosón de Higgs generaría las masas, primero debemos tener claro el concepto de campo. Un campo es sencillamente una magnitud (como lo es la temperatura), definida en cada punto de una región del espacio y el tiempo (imaginémonos la superficie de una sartén). En física, el término "campo" suele reservarse para designar el campo gravitacional y el electromagnético. Los campos, en general, ejercen su acción mediante el intercambio de una partícula transmisora; por ejemplo, la partícula que transmite el campo electromagnético es el fotón, o cuanto de luz. Las partículas que transmiten el campo gravitacional, el campo débil y el campo fuerte son, respectivamente, el gravitón (aún por detectar), tres bosones vectoriales débiles, las llamadas partículas $W^+$, $W^-$ y $Z^0$, y ocho gluones. De manera más o menos análoga, el bosón de Higgs es la partícula transmisora del propuesto campo de Higgs.

Se admite hoy que existe un campo de Higgs constante en todo el espacio; es decir, el vacío del espacio exterior no sería tal, sino que poseería este campo constante. Se cree que el campo de Higgs genera las masas acoplándose a las partículas. Según la intensidad del acoplamiento, una partícula del espacio presentará determinada energía potencial. En virtud de la famosa ecuación de Einstein $E = mc^2$ (la energía es igual a la masa multiplicada por el cuadrado de la velocidad de la luz), la energía de acoplamiento equivale a una masa. A mayor acoplamiento habrá mayor masa.

Se piensa que las partículas adquieren masa, en sus interacciones con el campo de Higgs, de manera análoga a como los trozos de papel secante absorben la tinta. En esa comparación, los trozos de papel representan las partículas individuales; la tinta, la energía o la masa. Así como los trozos de papel de distinto tamaño y espesor absorben cantidades diferentes de tinta, las diversas partículas "absorben" cantidades distintas de energía o de masa. La masa observada de una partícula depende de su capacidad de "absorber

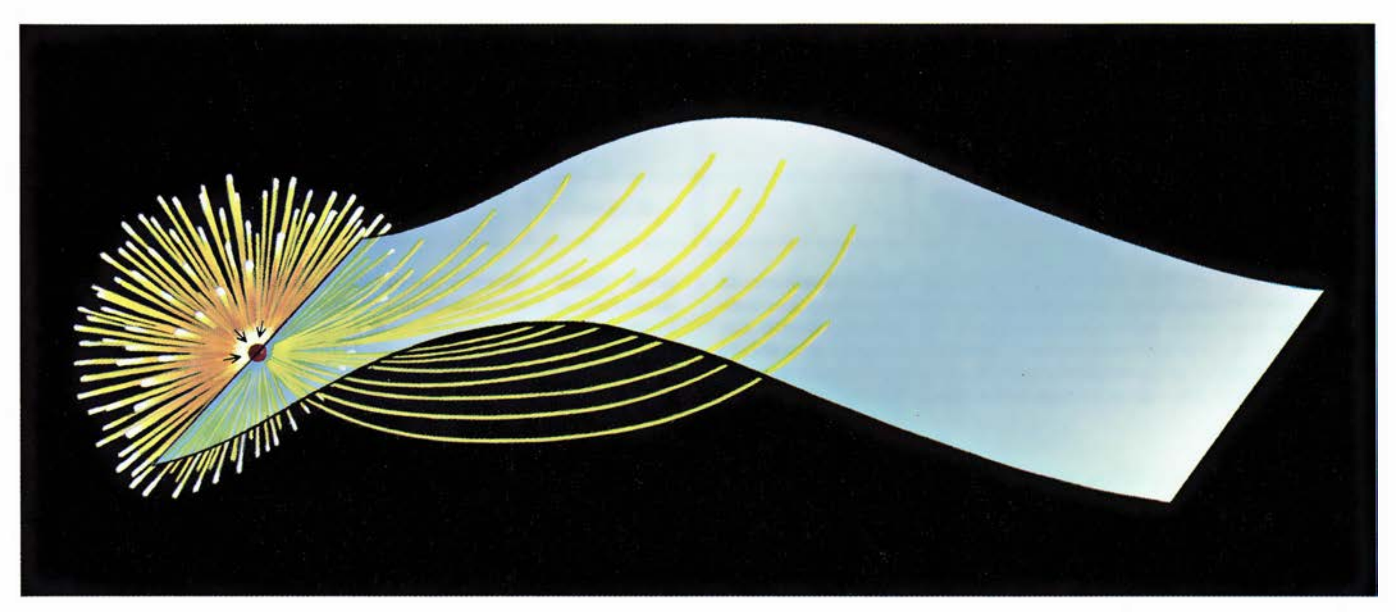
energía" y de la intensidad del campo de Higgs en el espacio.

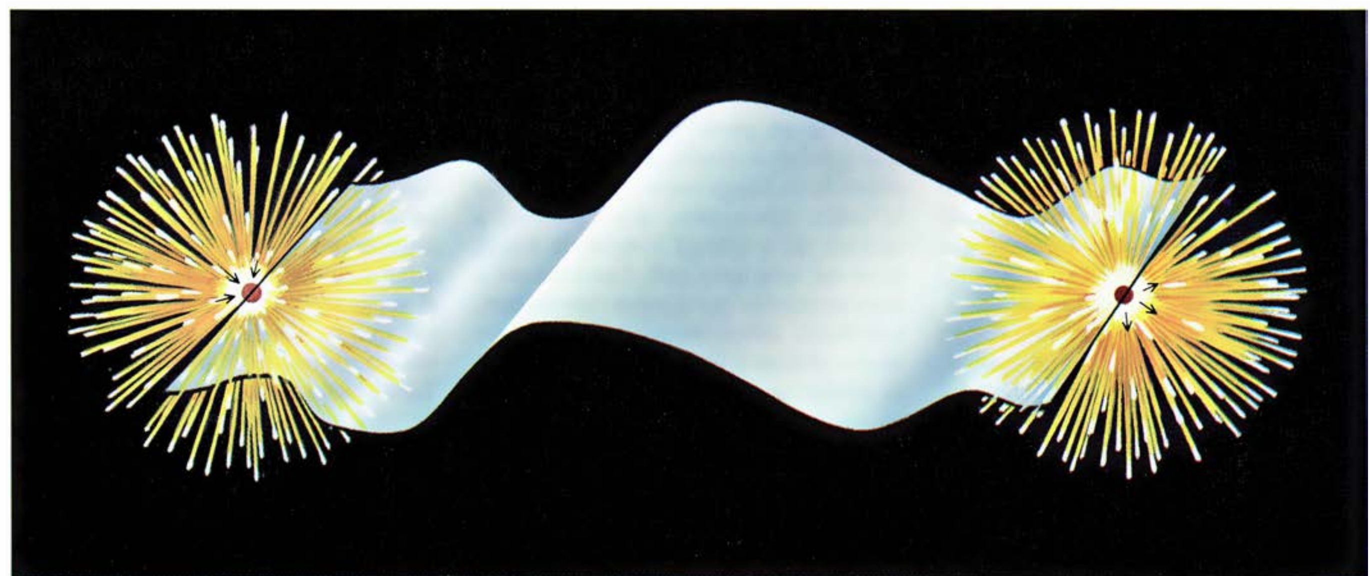
¿Qué características definen el campo de Higgs que se propone? Para que albergue las partículas con masa, el campo de Higgs, caso de existir, debería adquirir un valor uniforme no nulo, incluso en el vacío. El de Higgs sería, además, un campo escalar, que es una de las dos clases de campo que importan en la descripción de las interacciones entre partículas. En el campo escalar, cada punto tiene asociado una cantidad o número. El otro campo de interés es el campo vectorial, en cada punto del cual se dibuja una flecha o vector. El vector no sólo indica una cantidad, que se representa por la longitud de la flecha, sino también una dirección. Los campos electromagnéticos, débil y fuerte son todos ellos campos vectoriales. (El campo gravitacional es una entidad especial conocida como campo tensorial.)

El campo de Higgs propuesto debe ser escalar; si fuera un campo vectorial, la masa de la partícula dependería, en general, de la alineación de la partícula con el campo. Dicho de manera un tanto simplista, la masa de una persona cambiaría con sólo que ésta girara sobre sí misma, sin moverse del sitio. En otras palabras, el campo de Higgs es un campo "sin espín". Por carecer de espín el campo, tampoco debe tenerlo el bosón de Higgs. El término espín, aplicado a las partículas elementales, es una propiedad mecánico-cuántica que viene a representar lo que en física clásica es el momento angular de una pelota en rotación. Las partículas elementales sólo admiten valores del espín enteros (0, 1, 2, ...) y semienteros (1/2, 3/2, ...). Las partículas que tienen el espín entero se llaman bosones; fermiones, las partículas que lo tienen semientero. Los bosones y los fermiones ofrecen propiedades distintas, pero no profundizaré aquí en este tema.

Se dice que el bosón de Higgs es un bosón escalar porque posee espín nulo. Se piensa que la mayoría de los restantes bosones asociados a campos son bosones vectoriales: partículas dotadas de espín 1. El fotón, el gluon y las partículas $W^+$, $W^-$ y $Z^0$, por ejemplo, son bosones de espín 1.

Por hallarse los bosones vectoriales asociados de suyo a las fuerzas funda-





**1. MONOPOLOS MAGNETICOS. Deberían producirse si en la naturaleza existiera el bosón de Higgs. Clásicamente, los monopolos magnéticos nunca llegan a presentarse, pues cuando un imán se corta en dos resultan dos imanes más pequeños y no polos "norte" y "sur" aislados. Los monopolos magnéticos podrían formarse, sin embargo, confinando líneas de campo magnético debajo de la "barrera" de Higgs (*arriba*). La ilustración inferior muestra un par de monopolos. Aunque se han publicado informes dispersos sobre hallazgos de monopolos, hasta ahora ninguno de ellos ha recibido la obligada confirmación.**

| LEPTONES | | | |
|---|---|---|---|
| NOMBRE DE LA PARTICULA | SIMBOLO | MASA EN REPOSO (MeV) | CARGA ELECTRICA |
| NEUTRINO ELECTRONICO<br>ELECTRON | $\nu_e$<br>$e^-$ | PROXIMA A 0<br>0,511 | 0<br>−1 |
| NEUTRINO MUONICO<br>MUON | $\nu_\mu$<br>$\mu^-$ | PROXIMA A 0<br>106,6 | 0<br>−1 |
| NEUTRINO TAUONICO<br>TAU | $\nu_\tau$<br>$\tau^-$ | MENOR QUE 164<br>1784 | 0<br>−1 |

| QUARKS | | | |
|---|---|---|---|
| NOMBRE DE LA PARTICULA | SIMBOLO | MASA EN REPOSO (MeV) | CARGA ELECTRICA |
| "ARRIBA"<br>"ABAJO" | *u*<br>*d* | 310<br>310 | + ⅔<br>− ⅓ |
| ENCANTADO<br>EXTRAÑO | *c*<br>*s* | 1,500<br>505 | + ⅔<br>− ⅓ |
| "CIMA"/VERDAD<br>"VALLE"/BELLEZA | *t*<br>*b* | 22.500; PARTICULA HIPOTETICA<br>PROXIMA A 5000 | + ⅔<br>− ⅓ |

| FUERZA | ALCANCE | INTENSIDAD A $10^{-13}$ CENTIMETROS EN COMPARACION CON LA FUERZA FUERTE | TRANSMISOR | MASA EN REPOSO (GeV) | ESPIN | CARGA ELECTRICA | OBSERVACIONES |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| GRAVEDAD | INFINITO | $10^{-38}$ | GRAVITON | 0 | 2 | 0 | CONJETURADO |
| ELECTROMAGNETISMO | INFINITO | $10^{-2}$ | FOTON | 0 | 1 | 0 | OBSERVADO DIRECTAMENTE |
| DEBIL | MENOR QUE $10^{-16}$ CENTIMETROS | $10^{-13}$ | BOSONES VECT. DEBILES $W^+$ | 81 | 1 | +1 | OBSERVADO DIRECTAMENTE |
| | | | $W^-$ | 81 | 1 | −1 | OBSERVADO DIRECTAMENTE |
| | | | $Z^0$ | 93 | 1 | 0 | OBSERVADO DIRECTAMENTE |
| FUERTE | MENOR QUE $10^{-13}$ CENTIMETROS | 1 | GLUONES | 0 | 1 | 0 | CONFINADO PERMANENTEMENTE |

**2. DE ACUERDO CON EL MODELO ESTANDAR, hay 12 constituyentes fundamentales de la materia (*arriba*) y cuatro fuerzas básicas (*abajo*). Los constituyentes de la materia se dividen en dos grupos de seis: leptones y quarks. Los leptones gozan de existencia independiente, mientras que nunca se ha aislado un quark individual. Los quarks forman parte de partículas mayores: protones y neutrones; se cree que el protón consta de dos quarks "arriba" ("up") y un quark "abajo" ("down"). Las partículas interaccionan entre sí mediante las cuatro fuerzas. A su vez, cada fuerza tiene una partícula asociada a ella (llamada bosón) que transmite la fuerza. La de Higgs, si existe, sería otra más, la quinta, que vendría transmitida por el bosón de Higgs. Las masas de los constituyentes fundamentales se dan en millones de electronvolt (MeV) y las masas de las partículas que transmiten las fuerzas se dan en miles de millones de electronvolt.**

mentales de la naturaleza y ser el de Higgs un bosón escalar, la fuerza mediante la cual las partículas se acoplan al campo de Higgs debe ser una fuerza nueva. Se introduce explícita y únicamente como una construcción que aporte rigor matemático al modelo estándar. La fuerza de Higgs se comporta, desde el punto de vista matemático, de manera similar a la "quinta fuerza", de la que acaban de dar cuenta los trabajos de Ephraim Fischbach, de la Universidad de Purdue. La hipotética fuerza de Higgs es, sin embargo, más débil y tiene un alcance mucho más corto que la "quinta fuerza".

La fuerza de Higgs no es una fuerza universal, ya que se acopla de manera distinta a las diferentes partículas. En concreto, si se observa que una partícula posee determinada masa, se da por supuesto que su acoplamiento con el campo de Higgs posee la intensidad necesaria para generar dicha masa. Presumiblemente, el campo de Higgs no se acopla al fotón, ya que la experiencia indica que el fotón carece de masa. Pero parece que sí se acopla a las partículas $W^+$, $W^-$ y $Z^0$, porque éstas sí que tienen masa. Quizás convenga señalar que las partículas podrían tener una masa propia, además de la que se piensa que adquieren gracias al campo de Higgs. Curiosamente, sin embargo, según el modelo estándar ninguna partícula puede tener masa por sí misma sin destruir la congruencia matemática de la teoría.

Desde un punto de vista físico, no ganamos mucho concediendo que el bosón de Higgs sea el responsable de la masa. Ignoramos, por ejemplo, a qué se debe que el campo de Higgs haya de acoplarse más fuertemente a unas partículas que a otras. Ignoramos, asimismo, cómo surge la masa (por ahora desconocida) del propio bosón de Higgs, aunque suele admitirse que, en su mayor parte, se debe a una autointeracción con el campo de Higgs. En este sentido, el desconocimiento del origen de las masas de las partículas se sustituye por la ignorancia de los acoplamientos de las partículas con el campo de Higgs; no se da, pues, ningún paso adelante.

Por otro lado, la introducción del bosón de Higgs crea un importante problema con respecto al campo "sagrado" de la gravitación. La equivalencia de la masa y la energía implica que el gravitón, que se acopla a cualquier cosa dotada de masa, debe acoplarse a cualquier cosa dotada de energía, incluyendo el campo de Higgs. El acoplamiento del gravitón con el omnipresente campo de Higgs generaría una enorme "constante cosmológica": curvaría el universo hasta dejarlo del tamaño aproximado de una pelota de fútbol. Si se supone que el bosón de Higgs tiene más o menos la misma masa que los bosones vectoriales débiles, la densidad de energía del campo de Higgs en el vacío sería 10 billones de veces mayor que la densidad de materia en un núcleo atómico. Si se comprimiera la Tierra hasta alcanzar tamaña densidad, su volumen sería de unos 500 centímetros cúbicos, poco más que el tamaño de una lata de cerveza. No hace falta decir que esto es contrario a la experiencia.

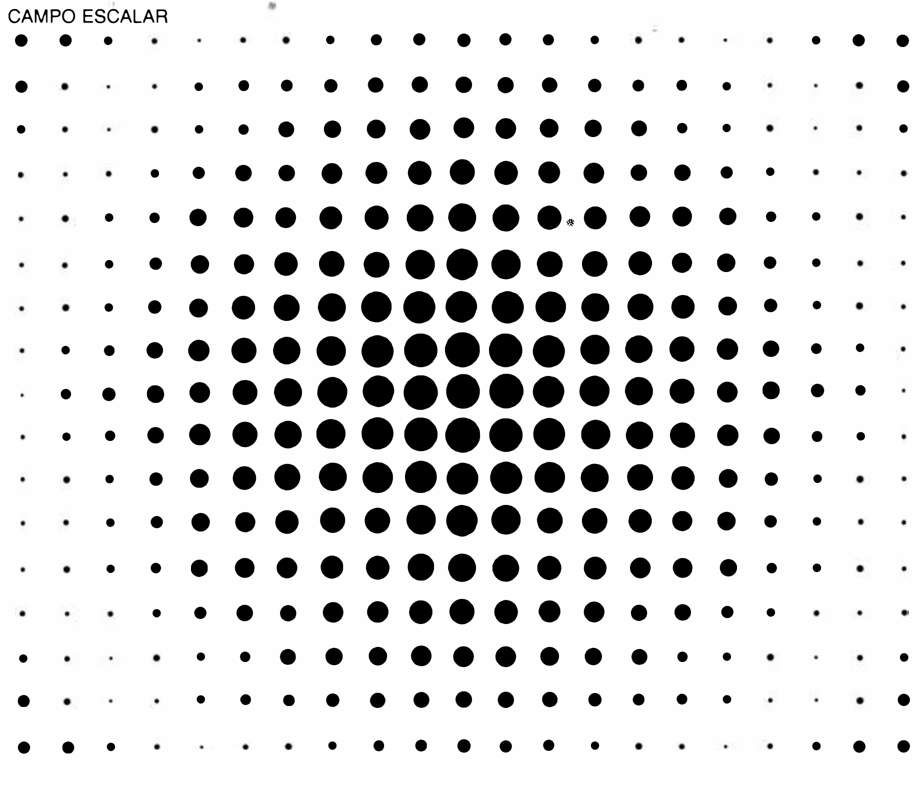
Vale la pena llamar la atención sobre la "salida" de los teóricos. Suponen que el "verdadero" vacío (el que no tiene campo de Higgs) está curvado en sentido negativo: tiene una constante cosmológica de la misma magnitud que

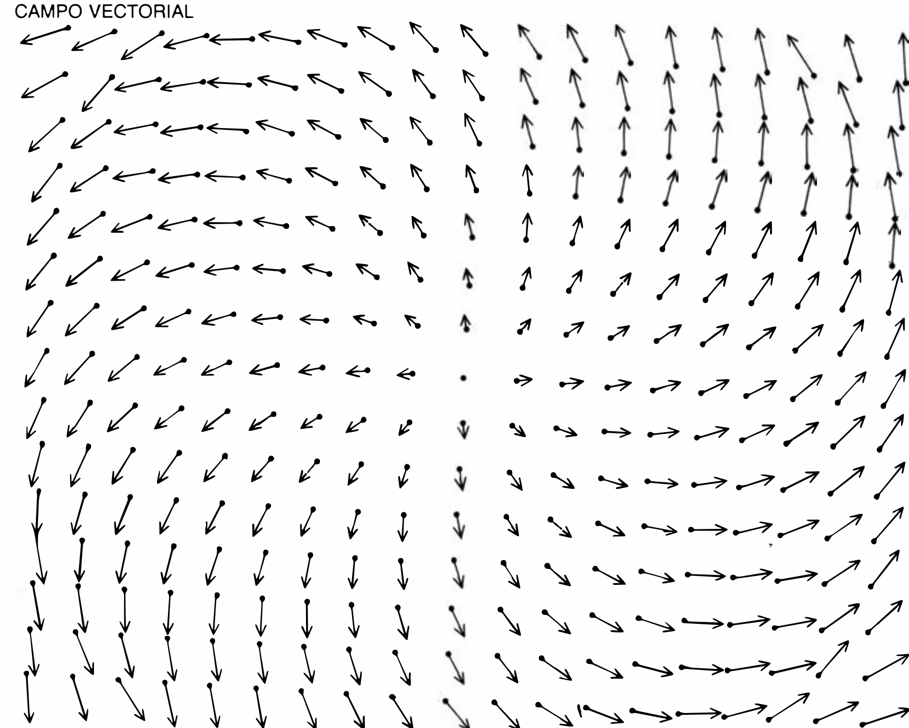
la generada por el campo de Higgs, aunque de signo contrario. La introducción del campo de Higgs aplana entonces el espacio para convertirlo precisamente en el universo que conocemos. Se trata, a todas luces, de una solución de escaso atractivo, lo que ha obligado a buscar caminos más ingeniosos para resolver el problema de la gran constante cosmológica. Ninguno de esos intentos ha tenido éxito. Si acaso, las cosas han empeorado: los teóricos siguen colocando más partículas y campos en el vacío. Quizás el universo se haya aplanado a partir de la dinámica de la gran explosión, a la que se atribuye el origen del universo hace 15.000 o 20.000 millones de años.

El estado actual de la teoría, con un campo de Higgs, no contradice explícitamente la observación diaria, aunque haya que aceptar la increíble desaparición de la constante cosmológica. Ciertas ampliaciones de la teoría, propuestas durante el pasado decenio, implican a menudo la introducción de campos de Higgs adicionales. Aunque los argumentos a favor de tales ampliaciones son a menudo convincentes, los fenómenos asociados a estos campos de Higgs adicionales, o no se han visto nunca, o contradicen los hechos observados.

Por citar un ejemplo: con el fin de explicar de manera elegante ciertas simetrías observadas en las interacciones fuertes, dos investigadores propusieron un segundo campo de Higgs: Helen R. Quinn, del Stanford Linear Accelerator Center (SLAC), y Roberto Peccei, del Deutsches Elektronen-Synchrotron (DESY, el acelerador de electrones de Hamburgo). La teoría en cuestión predice una nueva partícula, presumiblemente muy ligera, denominada axión. Hasta ahora, a pesar de las afanosas búsquedas efectuadas, no se ha encontrado el tal axión. Por si fuera poco, la teoría conduce a consecuencias cosmológicas desconcertantes a propósito del fenómeno de las "fronteras de dominio" ("domain walls"). En general, una frontera de dominio señala el lugar de encuentro de dos regiones de propiedades distintas. Un caso de esos límites lo tenemos en los imanes permanentes: allí donde una región cuyos átomos presentan sus espines alineados en una dirección se encuentra con otra región cuyos átomos muestran sus espines alineados en otra dirección distinta.

Se cree que ciertos campos de Higgs habrían producido fronteras de dominio en el universo primitivo. Cuando el universo era joven, reinaba una temperatura extremadamente alta y no parece que existiera ningún campo de Higgs. Llegado cierto momento, el universo se habría enfriado lo suficiente como para permitir la aparición de un campo de Higgs de fondo. A no ser que se tratara de un enfriamiento completamente uniforme, es probable que el campo de Higgs presentara propiedades distintas según la región del espacio. El alcance que tuvieran los efectos producidos por el contacto entre tales regiones, tomando forma de fenómenos visibles, o incluso violentos, de-




**3. LOS CAMPOS son importantes para describir las interacciones mutuas entre las partículas. Por campo se entiende una cantidad (como la temperatura) definida en cada punto de una región del espacio y el tiempo (pensemos en la superficie de una sartén). Hay campos escalares (*arriba*) y campos vectoriales (*abajo*). El campo escalar posee, en cada punto, asociada una única magnitud o número, que aquí se representa por el área de los puntos. Un campo vectorial tiene, además de magnitud, que se simboliza por la longitud de una flecha, una dirección, que se indica por la orientación de la flecha en el espacio. Los campos electromagnéticos, débiles y fuertes son ejemplos de campos vectoriales; el de Higgs, en la hipótesis de que existiera, sería un campo escalar. (El campo gravitacional es una entidad especial denominada campo tensorial.)**

pende de las propiedades concretas de los campos de Higgs, pero sería de esperar alguna clase de conflicto en conexión con la sugestiva propuesta de Quinn y Peccei.

Ahora bien, ¿por qué no se han observado las fronteras de dominio entre tales regiones? Ello podría indicar que no hay campo de Higgs, o que la naturaleza ha sido reticente a mostrarnos ese campo. También pudiera ser que las fronteras hubieran desaparecido en los primeros momentos de la historia del universo. Es algo bastante típico: se empieza con un razonamiento atractivo, se cae en el campo de Higgs y entonces la idea hace agua. Ciertamente esto inspira poca confianza en todo el mecanismo.

La introducción de un bosón de Higgs adicional provoca también dificultades en un modelo que está ganando la atención de muchos investigadores: me refiero a la teoría SU(5) de gran unificación. En líneas generales, las teorías unificadas se proponen dar cuenta de las cuatro fuerzas en función de una sola fuerza fundamental. La introducción y verificación de la llamada teoría electrodébil en las dos últimas décadas significó un paso importante hacia la consecución de esta meta. La teoría mantiene que la fuerza electromagnética y la fuerza débil son manifestaciones de una misma fuerza subyacente: la fuerza electrodébil. La teoría electrodébil recibió una confirmación espectacular, en 1983, en el CERN, el laboratorio europeo de física de partículas, con la detección de las partículas $W^+$, $W^-$ y $Z^0$.

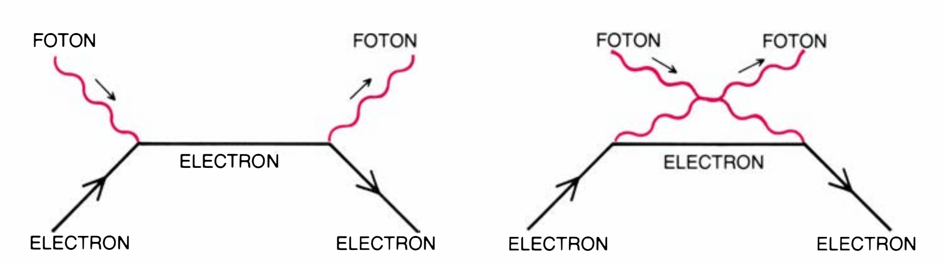
La teoría SU(5) de gran unificación intenta fundir la fuerza fuerte y la fuerza electrodébil en una fuerza común; la designación SU(5) indica el grupo matemático de simetrías en el que se basa la teoría. Según la teoría SU(5), las fuerzas fuertes, débiles y electromagnéticas, que se comportan de manera muy distinta en circunstancias ordinarias, se tornan indistinguibles cuando las partículas interaccionan con una energía de aproximadamente $10^{15}$ miles de millones de electronvolt (GeV).

La unificación de la interacción fuerte con la fuerza electrodébil exige la presencia de un conjunto adicional de bosones vectoriales, cuyas masas serían varios órdenes de magnitud mayores que las masas de los bosones vectoriales débiles. Como los nuevos bosones vectoriales son tan pesados, necesitan un campo de Higgs para ellos. Por tanto, según la teoría SU(5), el vacío contiene dos campos de Higgs que se acoplan con diferentes intensidades a las distintas partículas.

La consecuencia más importante de la teoría SU(5) es que los quarks, a través del nuevo conjunto de bosones vectoriales, pueden transformarse en leptones. Si es así, el protón –"inmortal" conglomerado de tres quarks– podría desintegrarse en partículas más ligeras: en un positrón (un tipo de leptón que es algo así como un electrón cargado positivamente) y una partícula llamada pion. Supuesta la existencia de dos campos de Higgs, el ritmo de desintegración puede calcularse. Sin embargo, en los experimentos realizados en los últimos años no se ha encontrado ninguna de tales desintegraciones. Todo parece indicar que hay algo que no es correcto en la teoría SU(5), en el campo de Higgs o en ambos. Yo creo que los principales conceptos de la teoría SU(5) sobrevivirán a la larga. Además, si la teoría SU(5) de gran unificación fuera cierta y existiera el campo de Higgs, deberían haberse creado monopolos magnéticos en los primeros $10^{-35}$ segundos del universo. Un ejemplo de monopolo magnético es un polo aislado de un imán. (Clásicamente tales objetos no existen, porque si un imán se corta por la mitad se crean dos imanes menores, y no polos "norte" y "sur" aislados.) Los defensores de la teoría SU(5) no se ponen de acuerdo acerca de la composición interna de los monopolos y acerca de cuántos deben existir. En general, se acepta que el monopolo debe tener una masa enorme comparada con la de las partículas elementales, quizás $10^{16}$ o $10^{17}$ veces la del protón. Aunque se publiquen escritos aislados sobre el hallazgo de monopolos, ninguno de estos sucesos ha sido confirmado; diríase que a la naturaleza no le gusta nada que tenga que ver con los campos de Higgs. La búsqueda de los monopolos continúa [véase "Monopolos magnéticos superpesados", por Richard A. Carrigan, Jr., y W. Peter Trower; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, junio de 1982].

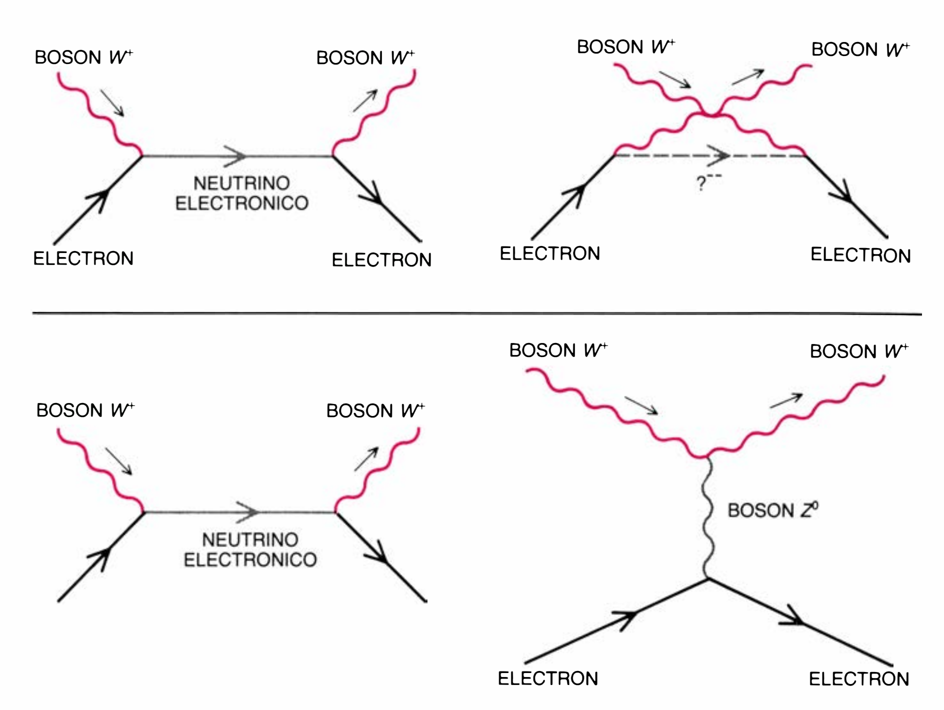
Hay más ejemplos que nos hablan de cuán parca ha sido la naturaleza en su uso de los campos de Higgs, si es que los ha llegado a emplear. Sucede que si en la teoría electrodébil se introduce sólo el tipo más sencillo de campo de Higgs nos encontramos con una relación entre las masas de los bosones $W$ y el bosón $Z^0$. La relación se expresa mediante un factor denominado pará-

ELECTRON
ELECTRON
FOTON
PROTON
PROTON




**4. DIAGRAMAS DE FEYNMAN: representaciones simplificadas de un procedimiento matemático para determinar la probabilidad de que una partícula colisione contra otra. En la ilustración superior, un electrón choca contra un protón intercambiando un fotón, el transmisor de la fuerza electromagnética. Las partículas pueden colisionar también entre sí mediante el intercambio de dos o más fotones (no se muestra aquí); ya que tales intercambios son estadísticamente menos probables, el intercambio de un fotón constituye una buena aproximación de la realidad. Un fotón puede colisionar contra un electrón. Se necesitan dos diagramas para esbozar tal interacción (*abajo*). En este caso resulta difícil imaginar la colisión en términos de una fuerza. Hay que pensar, por contra, en términos de procesos elementales: el fotón puede ser absorbido o emitido por un electrón. No existe una diferencia fundamental entre la colisión electrón-protón y la colisión electrón-fotón; se pueden imaginar ambos tipos de sucesos subatómicos cual si se tratara de procesos elementales.**

metro ϱ (rho), que viene a ser el cociente entre la masa del bosón $W$ y la masa del bosón $Z^0$. (Hay factores de corrección que no nos han de preocupar aquí.) El valor esperado del parámetro ϱ es 1; experimentalmente se encuentra que es 1,03, con un error estimado del 5 por ciento. Si hay más de un campo de Higgs, el parámetro ϱ puede tomar cualquier valor. Suponiendo que la concordancia entre la teoría y el experimento no es accidental, la conclusión lógica es que sólo existe un campo de Higgs.




**5. BOSON VECTORIAL DEBIL, el transmisor de la fuerza débil. Dicha partícula puede colisionar contra un electrón de un modo similar al choque producido entre un fotón y un electrón. La interacción de la parte superior derecha, aunque matemáticamente deseable, necesitaría la existencia de una partícula con doble carga negativa. No se sabe que tal partícula exista. El problema se resuelve introduciendo una partícula neutra, conocida como bosón $Z^0$ (*abajo, a la derecha*). Está comprobada la existencia del bosón.**

Al llegar a este punto se hace necesario preguntarse seriamente si el bosón de Higgs existe en la naturaleza. He mencionado antes que la única razón legítima para postular dicho bosón de Higgs estriba en aportar rigor matemático al modelo estándar. Históricamente, la introducción del bosón de Higgs para proporcionar tal coherencia no tuvo nada que ver con que luego se haya usado para explicar la masa. La idea de que el bosón de Higgs diera cuenta de la masa surgió de una línea de "construcción de modelos", en la que las teorías expresamente se ordenaban a modelar la naturaleza con toda la precisión posible. Entre los investigadores de esta línea se hallaban Sidney A. Bludman, de la Universidad de Pennsylvania, quien propuso la mayor parte del modelo en el que aparecen los bosones $W$, y Sheldon Lee Glashow, de la Universidad de Harvard, quien incorporó el electromagnetismo al modelo de Bludman. Steven Weinberg, de la Universidad de Texas en Austin, utilizando métodos desarrollados por Thomas W. B. Kibble, del Imperial College londinense de Ciencia y Tecnología, sustituyó la parte del modelo concerniente a las masas de las partículas por el mecanismo de generación de masas de Higgs. La integración de los quarks en la teoría de bosones vectoriales débese a Nicola Cabibbo y Luciano Maiani, de la Universidad de Roma, Y. Hara, de la Universidad de Tsukuba, y Glashow y John Iliopoulos, este último de la Escuela Normal Superior de París.

Todos estos trabajos se llevaron a cabo en un período de tiempo bastante largo, de 1959 a 1970. En ese mismo intervalo se publicaron también muchos otros escritos que sugerían nuevos enfoques sobre la construcción de modelos, pero ninguno de ellos, incluidos los que he citado, despertó la menor atención de la comunidad científica. En realidad, la mayoría de los autores tampoco creía en su propio trabajo y no proseguían adelante (con la excepción de Glashow e Iliopoulos). La razón de la desconfianza era obvia: nadie podía calcular nada. Los métodos y las matemáticas conocidos hasta entonces conducían a respuestas sin sentido. No había manera de predecir resultados experimentales.

Mientras me encontraba examinando el conjunto de resultados disponibles en 1968, caí en la cuenta de que las teorías de Yang-Mills (una clase general de teorías de las que el modelo estándar constituye un ejemplo) eran decisivas para la comprensión de las interacciones débiles y que no se podría progresar a menos que se resolvieran las dificultades matemáticas. Así pues, empecé a trabajar en lo que yo llamo la línea de la "teoría matemática"; en ella se presta poca atención al grado en que la teoría se corresponde con las observaciones experimentales. Se trata, por contra, de centrarse en el contenido matemático. En esta línea yo no era, en absoluto, el primer investigador. Fue iniciada por C. N. Yang y Robert L. Mills, del Brookhaven National Laboratory. Richard Feynman, del Instituto de Tecnología de California, L. Faddeev, de la Universidad de Leningrado, Bryce S. DeWitt, de la Universidad de North Carolina y Stanley Mandelstam, de la Universidad de California en Berkeley, habían realizado ya bastantes incursiones en este difícil tema.

Tampoco yo acabé el trabajo. La publicación concluyente fue la tesis que en 1971 sacó a la luz mi antiguo alumno Gerard't Hooft, que estaba entonces en la Universidad de Utrecht. En aquel momento pocos investigadores creían en el tema. Más de una vez se me dijo, con mejores o peores modales, que me estaba entreteniendo en "quitar el polvo de un extraño rincón de las interacciones débiles", en palabras de Sidney R. Coleman, de la Universidad de Harvard. Una notable excepción fue un grupo ruso, dirigido por E. S. Fradkin, de la Universidad de Moscú, que aportó contribuciones sustanciales.

Importa destacar que la línea de construcción de modelos y la línea de teoría matemática progresaron, durante muchos años, por caminos separados. Confieso que hasta 1971 no sabía nada acerca de la introducción del bosón de Higgs en la línea de construcción de modelos. En lo que a esto respecta, tampoco lo sabía 't Hooft. De hecho, recuerdo con claridad que cierto día le comenté que creía que su trabajo tenía algo que ver con el teorema de Goldstone (un concepto derivado de la línea de construcción de modelos). Como ninguno de nosotros conocía el teorema, cambiamos una mirada interrogante durante unos instan-

tes y decidimos no preocuparnos. Una vez más el progreso surgió de "no sabemos cómo", una frase acuñada por Weisskopf.

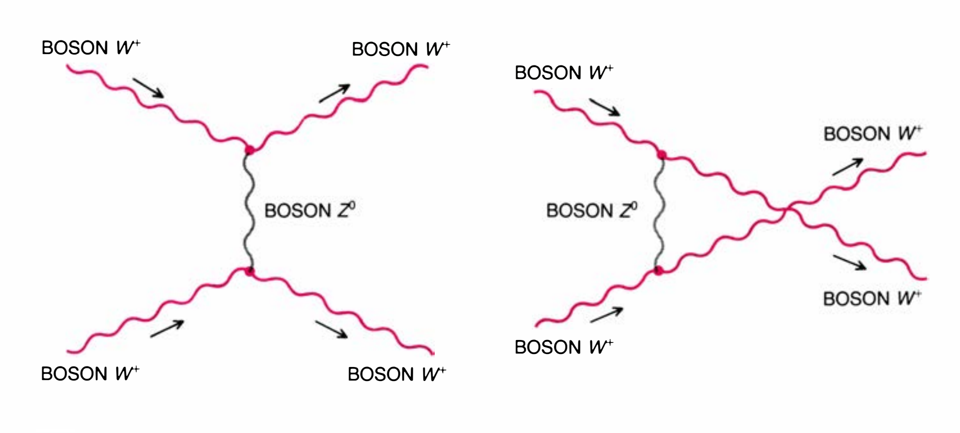
El progreso en la línea de teoría matemática nos enseñaría finalmente que la teoría electrodébil se comporta matemáticamente mejor y tiene mayor capacidad predictiva cuando se le incorpora el bosón de Higgs. En particular, el bosón de Higgs permite renormalizar la teoría: dados unos pocos parámetros, se pueden en principio calcular cantidades experimentalmente observables con toda la precisión que se quiera. Por el contrario, una teoría no renormalizable carece de poder predictivo más allá de cierto límite: la teoría es incompleta y las soluciones a ciertos problemas no tienen sentido.

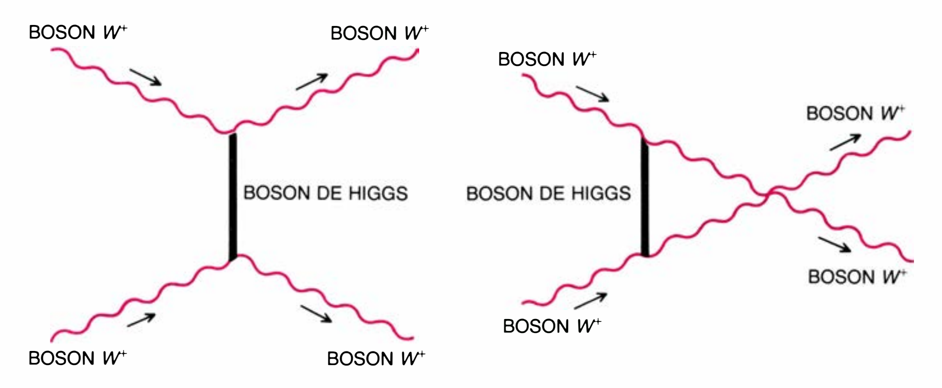
Debo señalar, sin embargo, que la teoría electrodébil permite hacer amplias predicciones, incluso sin el bosón de Higgs. Las predicciones conciernen a las fuerzas entre las partículas elementales. Dichas fuerzas son estudiadas en los laboratorios de física de altas energías mediante experimentos de colisión. En tales experimentos, se dirigen haces de partículas de alta energía contra una partícula "blanco". Por ejemplo, un haz de electrones puede colisionar con un protón. Analizando el diagrama de dispersión de las partículas incidentes se puede obtener algún conocimiento de las fuerzas.

La teoría electrodébil predice con éxito los efectos de las colisiones entre electrones y protones. También predice con éxito las interacciones de los electrones con los fotones, con los bosones *W* y con otras partículas llamadas neutrinos. Sin embargo, la teoría comienza a tambalearse en cuanto intenta predecir las interacciones de los bosones *W* entre sí. En particular, la teoría indica que, a energías suficientemente elevadas, la probabilidad de colisión de un bosón *W* con otro es mayor que 1. Resultado que no tiene ningún sentido, pues sería como decir que aunque el tirador de dardos apunte en dirección opuesta a la diana, conseguirá un blanco perfecto.

Pero he aquí que entonces aparece el bosón de Higgs como remedio salvador. El bosón de Higgs se acopla con los bosones *W* de suerte tal que la probabilidad de colisión cae dentro de los límites admisibles: un cierto valor determinado entre 0 y 1. En otras palabras, la incorporación del bosón de Higgs en la teoría electrodébil "elimina" el mal comportamiento. Una descripción más detallada del modo en que el bosón de Higgs permite renormalizar la teoría electrodébil exige una notación especial que se conoce con el nombre de diagramas de Feynman [*véanse las figuras 4-6*].

NEUTRINO MUONICO
NEUTRINO MUONICO
BOSON $Z^0$
ELECTRON
ELECTRON




**6. LA TEORIA ELECTRODEBIL RENORMALIZADA requiere la existencia del bosón de Higgs. Dados unos pocos parámetros, la teoría renormalizada puede usarse para calcular cantidades experimentalmente observables con la precisión que se desee. Por el contrario, una teoría no renormalizable carece de capacidad predictiva más allá de cierto límite: la teoría es incompleta y las soluciones a ciertos problemas no tienen sentido. Sin el bosón de Higgs la teoría electrodébil describe con éxito las colisiones de neutrinos con electrones (*arriba*). Sin embargo, la teoría se tambalea cuando intenta predecir la interacción de bosones *W* con ellos mismos (*en medio*). Concretamente, la teoría indica que a energías mayores que un billón de electronvolt (TeV) la probabilidad de colisión de un bosón *W* con otro bosón *W* es mayor que 1. Tal resultado no tiene sentido. La teoría se renormaliza, entonces, introduciendo el bosón de Higgs (*abajo*). Pueden hacerse predicciones plausibles "substrayendo" el conjunto de ilustraciones inferiores del conjunto del centro.**

Armados con el argumento de que el bosón de Higgs es necesario para renormalizar la teoría electrodébil, es fácil inferir cómo proceder a la búsqueda de la huidiza partícula: los bosones vectoriales débiles deben colisionar entre sí a energías extremadamente altas, a un billón de electronvolt (TeV) o más. Las energías necesarias se podrían alcanzar con el propuesto Supercolisionador Superconductor (SSC) de 20 TeV, cuya construcción está sujeta todavía a estudio en los Estados Unidos [véase "El supercolisionador superconductor", por J. David Jackson, Maury Tigner y Stanley Wojcicki; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA; mayo de 1986]. Si la distribución de partículas dispersadas sigue las predicciones de la teoría electrodébil renormalizada, habrá una

fuerza compensatoria, de la que el bosón de Higgs sería el candidato obvio. Si la distribución no sigue la predicción, entonces lo más probable es que los bosones vectoriales débiles interaccionen a través de una fuerza fuerte, con lo que se abriría una nueva área de la física.

La búsqueda del bosón de Higgs se encuentra con una gran dificultad: su masa no tiene de hecho ninguna restricción. Experimentalmente se determina que la masa debe ser mayor que 5 GeV. La teoría no da ninguna pista acerca de cuán pesado pueda ser el bosón de Higgs; sólo indica que, si su masa fuera de 1 TeV, la partícula daría lugar a alguna de las mismas dificultades que con ella se trataba de resolver: 1 TeV es aproximadamente 1000 veces la masa del protón. Llegados a tal punto la teoría sugiere que los bosones vectoriales débiles no podrían ya contemplarse como partículas elementales; serían estructuras compuestas por partículas más pequeñas.

La noción de una estructura compuesta no es, desde luego, nada nuevo en la historia de la física. Al principio del artículo mencioné cinco niveles de estructura conocidos: moléculas, átomos, núcleos, nucleones (protones y neutrones), quarks y leptones.

De atribuir al bosón de Higgs una estructura compuesta a suponer que partículas tan "fundamentales" como los quarks y los leptones son estructuras compuestas formadas por partículas aún menores [véase "La estructura de quarks y leptones", por Haim Harari; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, junio de 1983] sólo media un corto paso. En cierto sentido, la noción de un sexto nivel de estructura por debajo de los quarks y los leptones cierra el círculo. Tradicionalmente, la manera de explicar los parámetros libres ha sido la de descender a un nivel de estructura más profundo. El éxito de los modelos compuestos en la predicción de los niveles de energía de los átomos y los núcleos sugiere que la masa también podría predecirse acudiendo a un nivel de estructura más profundo. El hecho de que en el modelo estándar el bosón de Higgs sea responsable de todas las masas observadas implica que, aun cuando al final no exista el bosón en cuestión ni nada que se le parezca, habrá, por lo menos, un origen común para todas las masas. La búsqueda del bosón de Higgs vendría a ser, en última instancia, la inquisición de una estructura más profunda de las partículas elementales.

# Peces antárticos

*La mayoría de las especies de peces murieron al enfriarse o congelarse el océano Antártico, pero las de un suborden, Notothenioidei, encararon el reto. Sobreviven fabricando anticongelantes biológicos y ahorrando energía*

Joseph T. Eastman y Arthur L. DeVries

En febrero de 1899, el buque británico *Southern Cross* desembarcaba diez hombres en el cabo de Adare, en la Antártida, dando así comienzo la primera expedición, de un año entero, por el continente más austral del mundo. Muchos zoólogos atribuyen a la expedición, que marcó el inicio de la era "heroica" de la exploración antártica, un descubrimiento que les ha intrigado durante más de un siglo: el hábitat marino más frío del planeta está lleno de peces. El zoólogo de la expedición, Nicholai Hanson, que no sobrevivió en aquella gélida tierra, recogió muestras de especies piscícolas desconocidas hasta entonces.

Casi un siglo más tarde, seguimos en el empeño de comprender las adaptaciones que permiten a esos peces sobrevivir en una región otrora tenida por prácticamente inhabitable. Son de especial interés las adaptaciones evolutivas del suborden Notothenioidei, un grupo de teleósteos, peces óseos evolucionados, emparentado con los perciformes, comunes en casi todos los hábitats marinos. Este suborden, formado por 90 o 100 especies, está confinado esencialmente a la región antártica; allí señorea, dando cuenta de unos dos tercios de las especies piscícolas y del 90 por ciento de los peces de la zona.

Hemos centrado el grueso de nuestra investigación en dos interesantes adaptaciones. La primera, a todas luces decisiva para la supervivencia en aguas frías, es la capacidad de producir compuestos con poderosas propiedades anticongelantes. Estos compuestos rebajan el punto de congelación de los fluidos corporales. La segunda es la adquisición, en ciertas especies, de flotabilidad "neutra", o ingravidez en el agua. La ingravidez evita al pez tener que gastar una energía preciosa en flotación, lo que parece haber permitido la propagación de al menos dos especies de nototenioideos antárticos desde el fondo del mar, donde vive la mayoría, a las aguas medias, infrautilizadas.

Diversos acontecimientos geológicos y oceanográficos explican el extraordinario predominio de los nototenioideos antárticos. Durante gran parte de su historia, la Antártida estuvo unida a los restantes continentes australes en una gran masa terrestre emergida: el continente de Gondwana. El aglomerado empezó a desgajarse hace quizás unos 80 millones de años. Es probable que, en principio, las aguas que circundan la Antártida presentaran temperaturas razonablemente templadas, al menos en ciertos lugares. En un estudio reciente de fósiles de 38 millones de años de antigüedad, recogidos en la isla Seymour, uno de los autores (Eastman) y Lance Grande, del Museo de Campo de Historia Natural de Chicago, descubrieron que las aguas costeras albergaron, en tiempos, tiburones, peces sierra, rayas, quimeras, perros del norte y otros grupos de agua templada, hoy ausentes o mal representados en el Antártico.

Por la época en que se depositaron los fósiles de la isla Seymour, la Antártida se encontraba ya separada de Australia y del extremo de Sudamérica, y sus costas las rodeaban inmensas extensiones de océano frío y profundo. Una serie de complejos cambios ambientales contribuyó al enfriamiento de las aguas antárticas. En el propio océano, uno de los cambios consistió en la formación de la Convergencia Antártica, configuración de corrientes oceánicas que se extiende entre los 50 y 60 grados de latitud sur, que cercó el recién aislado continente y, con el tiempo, se convertiría en una barrera térmica formidable, que impediría el aflujo de corrientes cálidas y, en gran medida, de peces de aguas templadas venidos del norte.

Según cabe presumir, el agua fría provocó la desaparición de los peces de aguas templadas, salvo la de los nototenioideos, cuya evolución, al parecer, transcurrió ya bajo la influencia del frío. Hoy, debido a éste y a otros factores, el océano Antártico presenta menos diversidad incluso que el Artico, que posee vez y media más especies y el doble de familias. Entre esos factores anexos que justifican la falta de diversidad cabe señalar la escasez de grupos de islas y la profundidad de la plataforma continental en la periferia de la Antártida; en otros sitios, las aguas someras que circundan islas y costas constituyen un hábitat importantísimo para muchas especies de peces.

Para comprender la naturaleza de las adaptaciones que han permitido a los nototenioideos desarrollarse y medrar donde otros peces no lo han conseguido, los autores y sus colegas viajaron periódicamente a la isla Ross, situada unas 400 millas al sur del cabo de Adare. Durante casi 30 años, la National Science Foundation ha mantenido una estación biológica en esa estrecha faja volcánica, separada de tierra firme por los 65 kilómetros del estrecho de McMurdo.

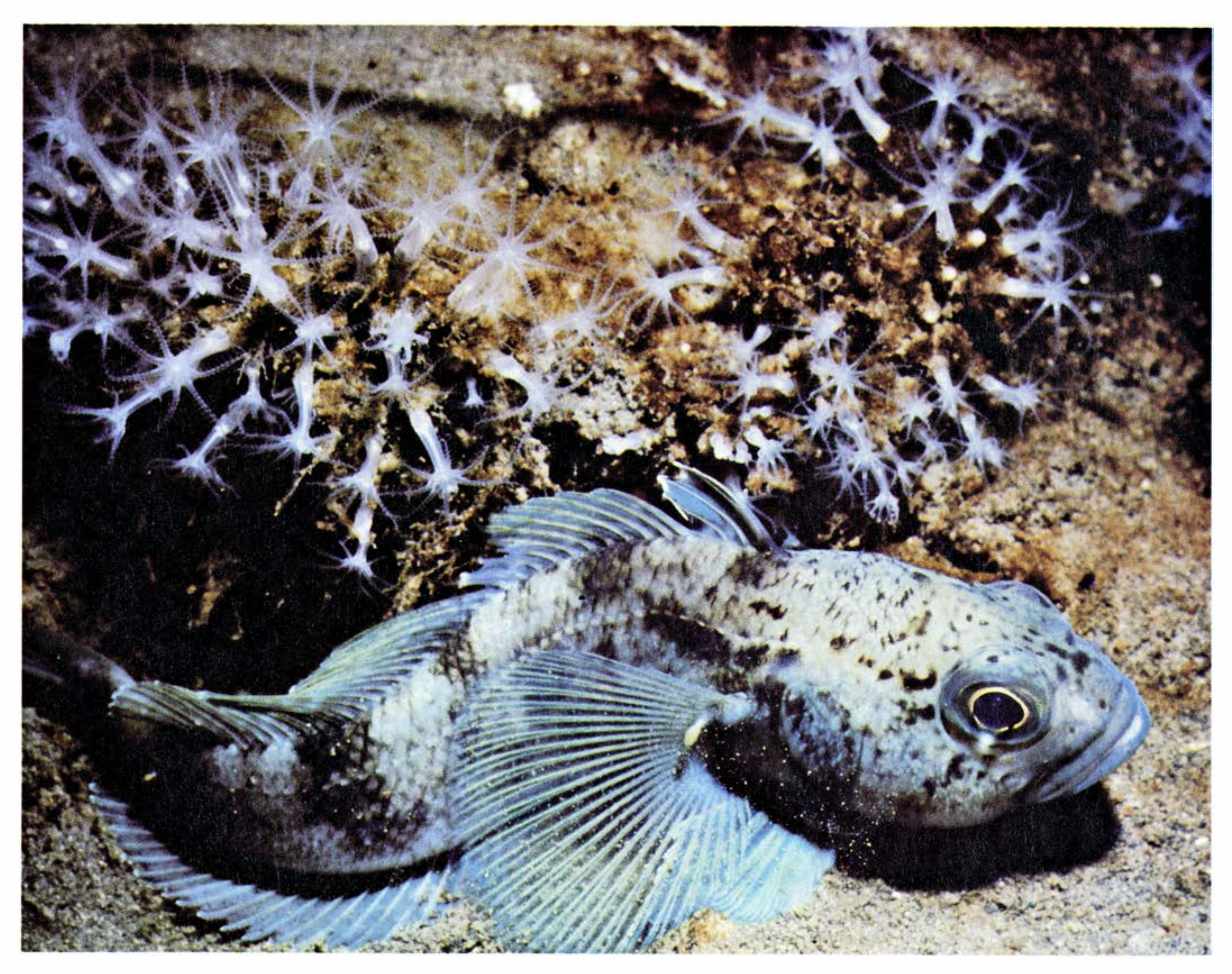
DeVries empezó a visitar la isla hace 20 años, interesado especialmente en aclarar el mecanismo que permite a los peces antárticos evitar la congelación. Se conocían ya entonces a grandes rasgos las condiciones imperantes en el estrecho. Por ejemplo, en 1961, Jack L. Littlepage, a la sazón en la Universidad de Stanford, determinó que la temperatura anual media en McMurdo era de −1,87 grados Celsius, con un intervalo de variación comprendido entre −1,4 y −2,15 grados. Durante el verano austral, de diciembre a febrero, las temperaturas ascienden de −1,9 a −1,8 grados Celsius. Incluso en verano, el agua situada por debajo del hielo recibe menos del uno por ciento de la luz que llega a la superficie; y aun eso es más que la obscuridad total que reina durante cuatro meses cada año.

Para los peces antárticos, el mayor peligro no radica en la oscuridad y el frío, sino en las múltiples capas de hielo. El agua permanece cubierta por dos o tres metros, si no más, de hielo marino "anual" durante un mínimo de diez meses al año –hasta el verano, cuando las tormentas suelen romperlo y lo arrastran mar adentro. Lindan con la superficie inferior del hielo anual uno o dos metros más de hielo plaquetario (cristales grandes, alargados, laxamente agregados), que desaparece a mediados de diciembre. Resta todavía otra capa de hielo de grandes cristales, conocido por hielo de anclaje, que, durante parte del año, cubre el fondo del brazo de mar, donde el agua no supera los 30 metros de profundidad.

Como se demostró en la década de 1950, la amenaza que plantea el hielo es que penetra con facilidad por las agallas y el integumento del pez. Los peces, que son de sangre fría y están a la misma temperatura que su medio ambiente, pueden sobrevivir con una temperatura en sangre de hasta un grado por debajo del punto de congelación: en términos prácticos, el punto en que pueden formarse cristales de hielo. Por otro lado, el pez aguanta ese "sobreenfriamiento" y mantiene la liquidez de los fluidos corporales si y sólo si el hielo no invade el cuerpo. Si lo hay alrededor de un pez que experimente un sobreenfriamiento de tan sólo 0,1 grados, puede propagarse con rapidez a través del integumento y congelar los fluidos corporales. En presencia de hielo, la mayoría de los peces de aguas tropicales y templadas se congelan cuando sus fluidos se enfrían aproximadamente a −0,8 grados Celsius. Sin embargo, los nototenioideos del estrecho de McMurdo se congelan sólo cuando su temperatura desciende hasta −2,2 grados.

Armados de esos datos, DeVries y sus alumnos emprendieron la tarea de fijar la contribución relativa de las diversas substancias al descenso del punto de congelación en los peces de McMurdo. En la mayoría de los peces marinos, las sales (en particular el cloruro sódico) de los fluidos corporales dan razón del 85 por ciento del descenso por debajo de cero grados, que es, por convención, el punto de congelación del agua pura. Cabe atribuir el descenso restante a pequeñas cantidades de potasio, calcio, urea, glucosa y aminoácidos, componentes comunes todos ellos de la sangre y los fluidos hísticos.

En los peces del estrecho de McMurdo, los investigadores hallaron que los niveles de cloruro sódico y otros iones y pequeñas moléculas sólo justificaban del 40 al 50 por ciento del descenso del punto de congelación, si bien las concentraciones de esas substancias eran algo más altas que las propias de las especies marinas templadas. El descenso del punto de congelación,

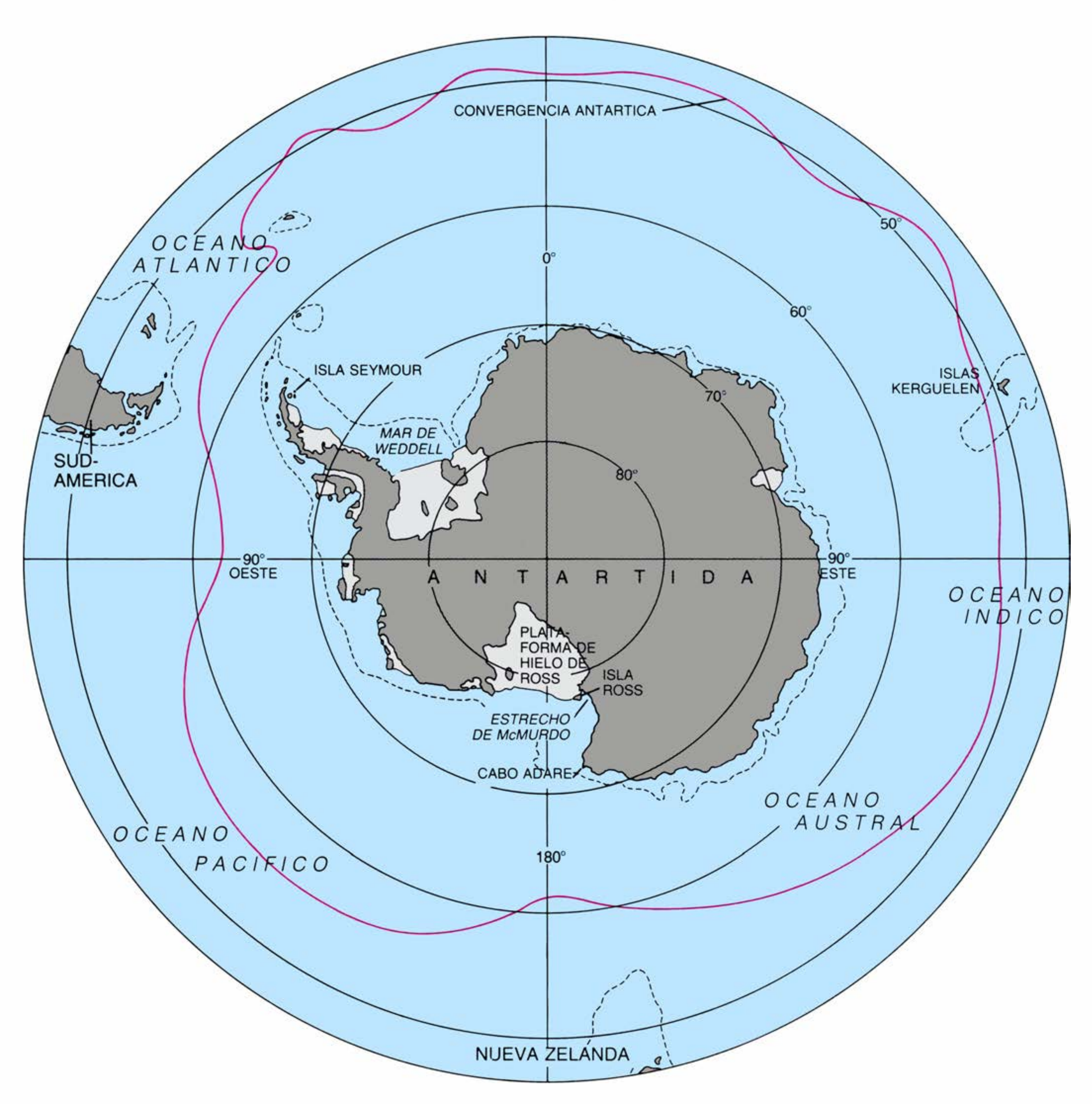


**1. NOTOTENIOIDEO TIPICO, *Trematomus nicolai*, que vive, se alimenta y reproduce cerca del fondo marino. El suborden Notothenioidei, grupo de peces óseos perciformes, domina, merced a sus moléculas anticoagulantes, las aguas del Antártico, dando razón de un 90 % de la fauna ictiológica de la región.**

y en definitiva la superviviencia de los peces del Antártico, se apoya en ocho tipos de moléculas anticongelantes, presentes en los fluidos corporales de la mayoría de las especies de nototenioideos estudiados hasta la fecha. La dotación completa aparece en casi todos los fluidos corporales, a excepción de la orina, el líquido ocular y el citoplasma de la mayoría de las células, y supone el 3,5 por ciento del peso de los fluidos.

Esas moléculas anticongelantes son glicopéptidos. Constan de unidades repetidas de una molécula de dos azúcares (un disacárido) unida por enlace covalente al tercer aminoácido de una cadena peptídica de tres [*véase la figura 3*]. Las moléculas difieren fundamentalmente en el tamaño; sus pesos moleculares van de los 2600 a los 33.700 dalton. En aras de la claridad se ha asignado a cada glicopéptido un número, función de su peso molecular: la molécula mayor es la 1 y, la menor, la 8. En los glicopéptidos del 1 al 5, la secuencia aminoacídica es alanina-alanina-treonina; en los restantes, la prolina substituye alguna de las alaninas. La actividad anticongelante de los ocho compuestos aumenta con el peso, si bien todas las moléculas parecen actuar de forma similar.

Se entenderá mejor el mecanismo

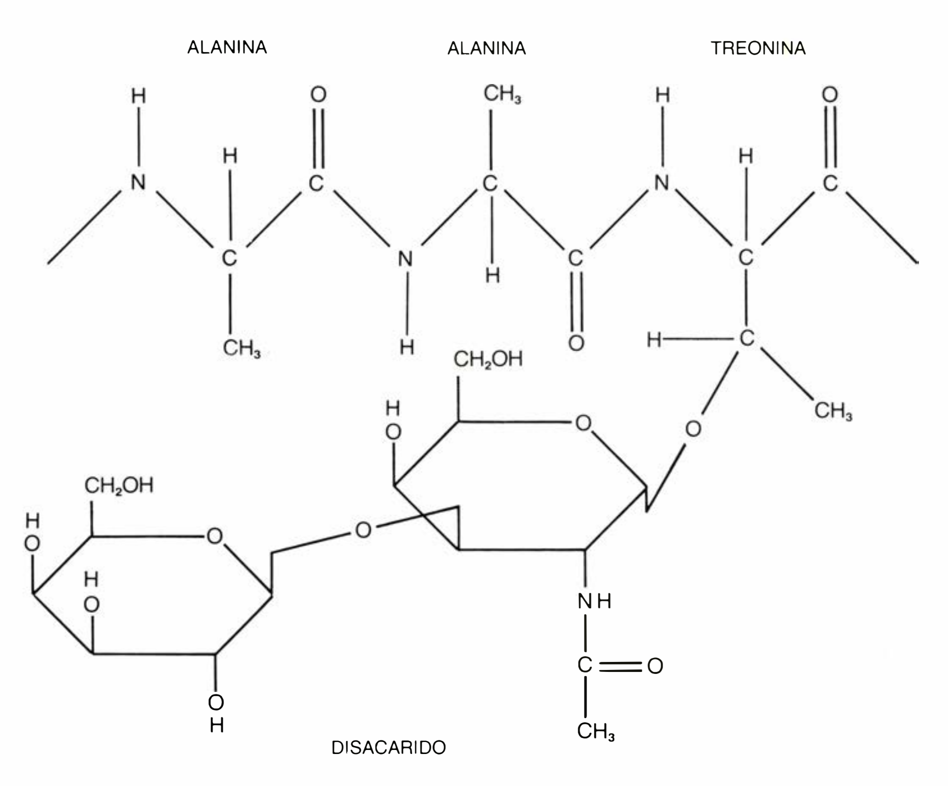



**2. CARACTERISTICAS OCEANOGRAFICAS que pueden haber influido en la evolución de los nototenioideos: la angosta y profunda plataforma continental y la Convergencia Antártica, una zona de brusco cambio térmico (*línea roja*). Las aguas próximas al margen de la Antártida alcanzan una profundidad de 1000 metros (*línea a trazos*), lo cual deja poco hábitat disponible para muchos peces de aguas someras que, de no ser por ello, competirían con los nototenioideos. La Convergencia Antártica, que señala el límite septentrional del "océano Austral" (donde se confunden los océanos Atlántico, Pacífico e Indico), impide que las aguas superficiales, cálidas, irrumpan en la región antártica. El desarrollo de la convergencia puede haber contribuido al enfriamiento del océano Austral y, por consiguiente, a la evolución de los nototenioideos bajo la influencia del frío. La temperatura del océano Austral rara vez supera los dos grados.**

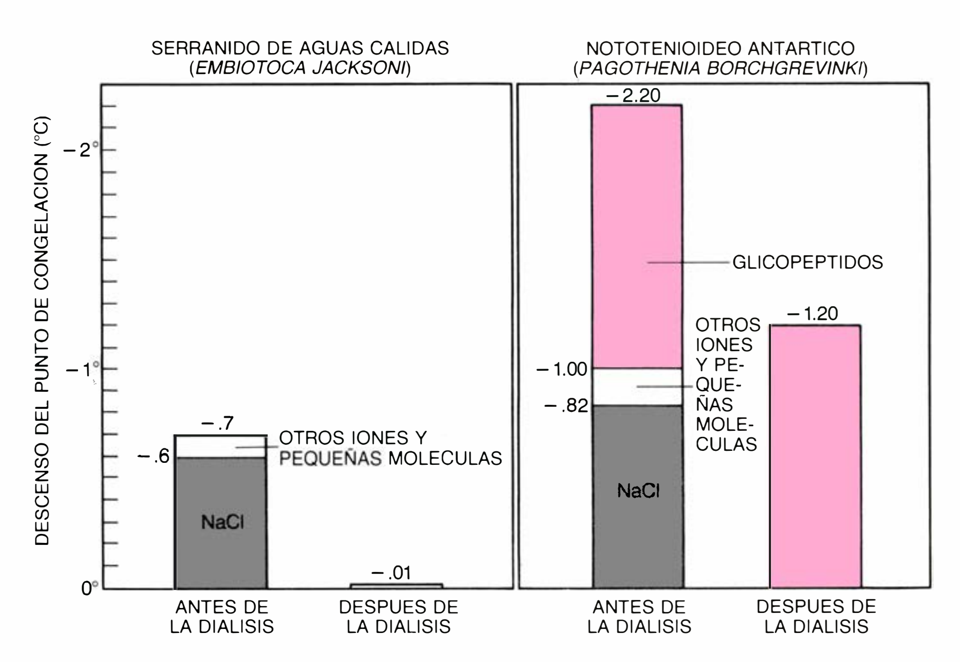
por el cual los anticongelantes de los nototenioideos rebajan el punto de congelación de los fluidos comparando su acción con la de solutos más típicos de los fluidos corporales, así la glucosa y el cloruro sódico. El punto de congelación de la mayoría de las disoluciones depende de sus propiedades "coligativas", es decir, del número de partículas de soluto, no de la naturaleza de las mismas. Cuantas más partículas hay, menos probable es que se agreguen las moléculas de agua y formen un cristal de hielo "embrionario". En el agua, el cloruro sódico rebaja el punto de congelación casi el doble que la glucosa, porque la sal se disocia en iones sodio y cloruro independientes. Los anticongelantes glicopeptídicos actúan, en cambio, de forma no coligativa: pueden abatir el punto de congelación de los fluidos corporales de 200 a 300 veces más de lo que sería de esperar atendiendo al número de partículas. (Rebajan también el punto de fusión, pero ligeramente y de modo coligativo.)

¿De qué mecanismo se valen esos glicopéptidos acoligativos para proteger de la congelación a los peces del estrecho de McMurdo en unas aguas cargadas de hielo? Los químicos saben desde hace mucho que las impurezas adsorbidas pueden inhibir el crecimiento de pequeños cristales y que, por razones poco claras, las impurezas que constan de gran número de subunidades moleculares repetidas son de particular eficacia al respecto. De ahí que uno de los autores (DeVries) sospechara que los anticongelantes glicopeptídicos protegían a los nototenioideos antárticos adsorbiéndose en los diminutos cristales de hielo e impidiendo así su crecimiento. Las investigaciones de DeVries y sus alumnos John G. Duman y James A. Raymond, a la sazón en la Institución Oceanográfica Scripps, confirman esa hipótesis. El grupo descubrió que, en efecto, los glicopéptidos se adsorben en el hielo cuando se está formando.

Aunque los acontecimientos registrados a escala molecular son de difícil visualización, el grupo ha propuesto un esquema verosímil. Creemos que el hielo no puede propagarse sobre las moléculas glicopeptídicas adsorbidas, lo que le obliga a crecer sólo en los pequeños espacios libres que quedan entre ellas [*véase la figura 6*]. Además, los frentes de cristalización se curvan y, por consiguiente, exponen una gran superficie en relación a su volumen. En




**3. SUBUNIDAD ESTRUCTURAL BASICA de los anticongelantes de los nototenioideos, que consta de un disacárido (dos azúcares) unido al tercer aminoácido de un tripéptido (cadena de tres aminoácidos). Las moléculas anticongelantes están compuestas por la repetición de esas subunidades; se identifican con un número, función de su peso molecular. (La 1 es la más pesada, de 33.700 dalton, y la 8 la más liviana, de 2600 dalton.) En los glicopéptidos del 1 al 5, la cadena peptídica de la subunidad presenta la secuencia alanina-alanina-treonina; en los del 6 al 8, la prolina ocupa el lugar de una de las alaninas (no se muestra).**




**4. COMPARACION DEL PLASMA SANGUINEO de un serránido del Pacífico (un pez de aguas cálidas) y un nototenioideo antártico; dicho cotejo explica las diferencias de composición y puntos de congelación. Los investigadores compararon los puntos de congelación del plasma antes y después de dializarlo, o filtrarlo, para extraer los solutos inferiores a 1000 dalton. Antes de la diálisis, el punto de congelación del serránido era de −0,7 grados Celsius; después de la diálisis ascendió a −0,01 grados, casi el punto de congelación del agua pura (0 grados). Tal cambio indica que el cloruro sódico y otros solutos menores son los responsables del débil descenso (por debajo de cero) del punto de congelación del plasma del serránido. Antes de la diálisis, el punto de congelación del plasma sanguíneo era de −2,20 grados; después de la diálisis ascendió a −1,20 grados. La persistencia de la depresión del punto de congelación tras la diálisis indica que los glicopéptidos de la sangre, cuyo peso molecular suele superar los 1000 dalton, dan cuenta de una porción significativa del descenso del punto de congelación de esa sangre; de hecho, explican casi la mitad del descenso.**

última instancia, los frentes de hielo pierden moléculas de agua en el líquido circundante, lo que detiene su crecimiento. Para que se incorporasen moléculas de agua a los frentes, habría que rebajar la temperatura del líquido. En otras palabras, el desarrollo de frentes muy curvados rebaja el punto de congelación del líquido.

Aunque esta hipótesis podría dar a entender que en los fluidos corporales se forman cristales de hielo y que la barrera de moléculas anticongelantes bloquea su desarrollo, experimentos recientes apuntan en otra dirección. Cuando se colocaban nototenioideos en agua sin hielo, no se congelaban hasta que la temperatura descendía a −6 grados. Al parecer, no se desarrollan cristales de hielo en el interior del cuerpo, a no ser que el hielo penetre primero desde el exterior. La mayor amenaza para la capacidad de sobrevivir al frío de los nototenioideos debe ser, por tanto, el hielo externo, y la principal función de los glicopéptidos probablemente consista en impedir que el hielo se propague a través del integumento. Otras pruebas vienen a corroborar esta hipótesis. Cuando se baña la superficie interior de una piel descamada con una solución salina que contiene moléculas de anticongelante, la piel actúa a modo de barrera contra la propagación del hielo desde el exterior. Cuando no hay moléculas de anticongelante, el hielo se propaga fácilmente a través del integumento.

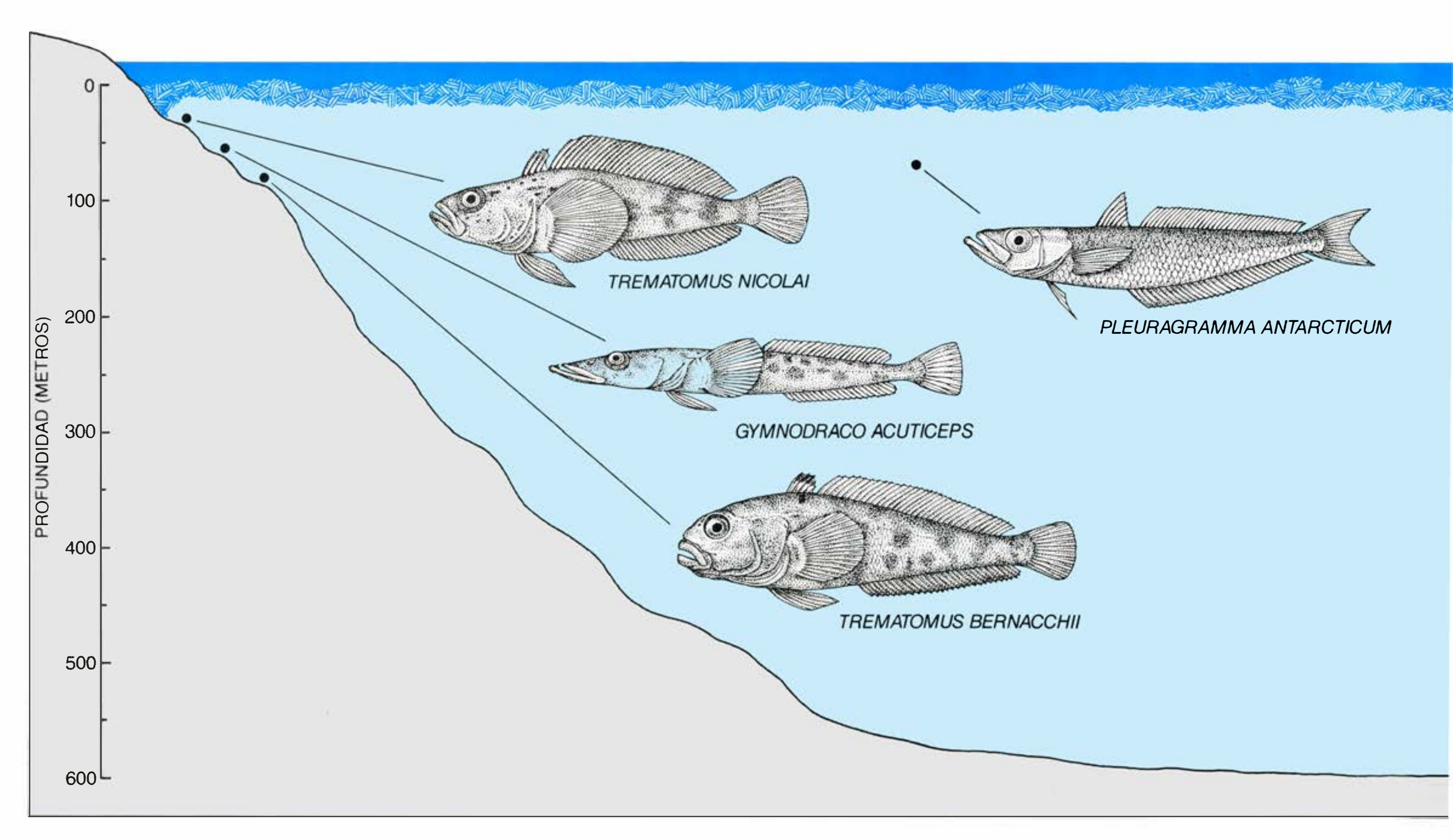
Ignoramos todavía, sin embargo, cómo se unen las moléculas de anticongelante al hielo, en parte porque se desconoce en detalle su estructura tridimensional en disolución. Sabemos que los grupos hidroxilo (−OH) y otros grupos polares de los anticongelantes se proyectan como ramas de un tronco central. Creemos, asimismo, que esos grupos son los puntos de unión. En efecto, hemos demostrado que los grupos hidroxilo de la fracción carbohidratada de los glicopéptidos son vitales para la actividad anticongelante de esas moléculas. Cuando inactivábamos dichos grupos por vía experimental (por adición de un acetilo, $CH_3CO-$), las moléculas glicopeptídicas perdían su efecto anticongelante.

Los grupos polares pueden formar enlaces de hidrógeno con las moléculas de agua del retículo de hielo, que se ordenan en filas de hexágonos con átomos de oxígeno en los "vértices". Para que se forme el máximo número de enlaces de hidrógeno entre el retículo de hielo y los grupos polares de los glicopéptidos, tendría que darse cierto casamiento entre las respectivas estructuras, es decir, los grupos deberían estar a distancias que se correspondiesen con las que median entre los átomos de oxígeno del frente de crecimiento del retículo de hielo.

Puede que ese requisito ideal se vea satisfecho en la realidad. Los modelos de glicopéptidos revelan que muchos hidroxilos de las cadenas laterales carbohidratadas distan entre sí 4,5 angstrom, precisamente el intervalo que suele separar a algunos de los átomos de oxígeno en el plano horizontal del retículo de hielo.

También podría unirse el anticongelante al hielo a través de los grupos carbonilo (−CO−) de la cadena aminoacídica. Quizá las cadenas laterales carbohidratadas de los glicopéptidos mantengan el esqueleto polipeptídico de la molécula en una configuración estirada. En esas condiciones, los restantes grupos carbonilo sobresaldrían por el mismo lado del polipéptido, a una distancia mutua de unos 7,3 angstrom. Análoga distancia media entre ciertos oxígenos del retículo de hielo.

Sea cual fuere su mecanismo de acción, no cabe duda de que los nototenioideos del estrecho de McMurdo deben disponer de los anticongelantes




**5. SIETE ESPECIES DE NOTOTENIOIDEOS figuran entre las 14 especies piscícolas del estrecho de McMurdo y las 90 del océano Austral. Muchos nototenioideos, así *Trematomus nicolai*, *T. bernacchii*, *T. loennbergii* y *Gymnodraco acuticeps*, moran cerca del fondo marino. Unas pocas especies se han indepen-**

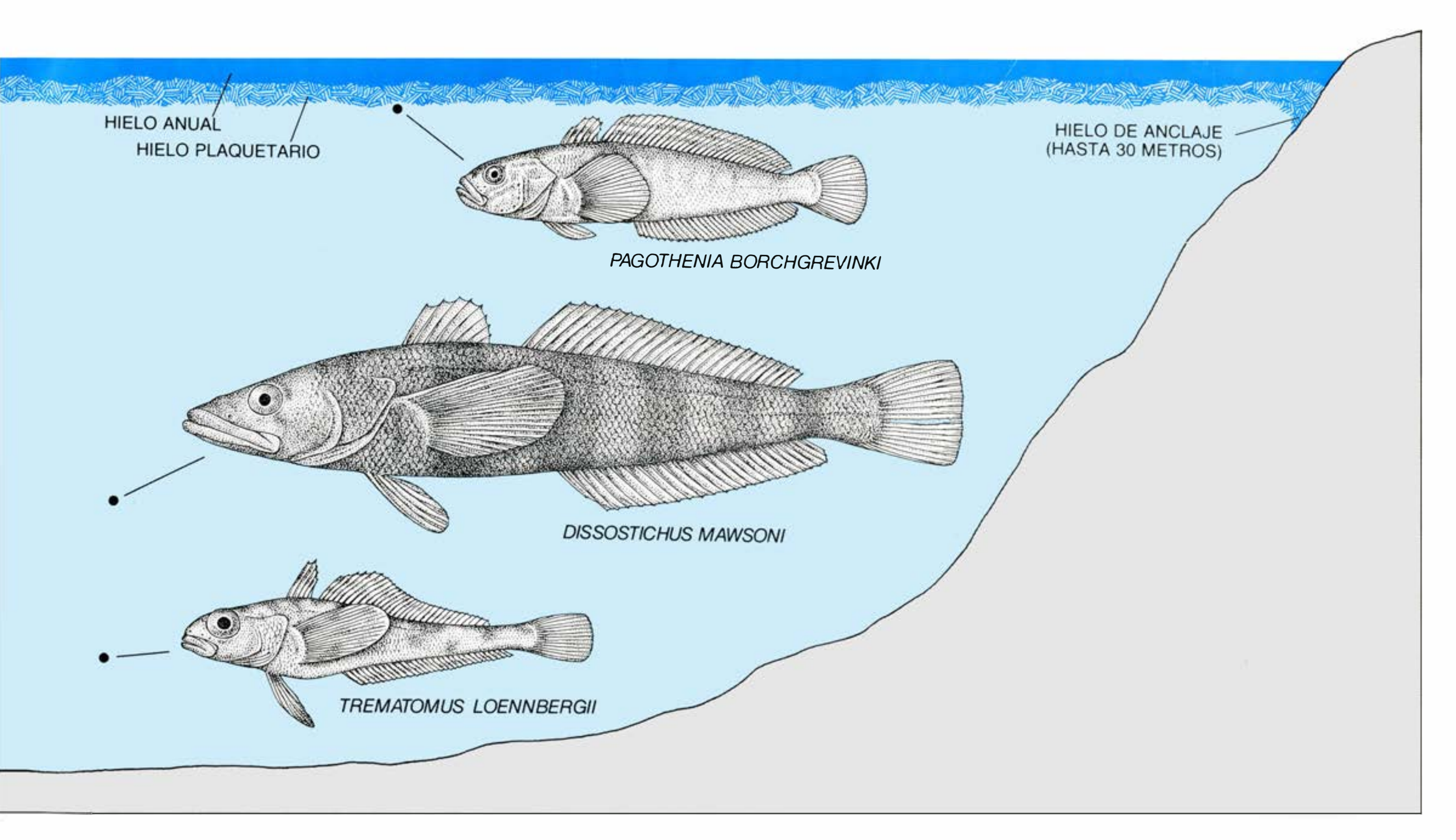
durante todo el año. Ello plantea un interesante problema. Las reservas de energía de los peces antárticos son limitadas; deben ahorrarla, sobre todo durante el invierno austral, cuando la productividad del ecosistema es especialmente baja. ¿Cómo mantienen un suministro adecuado de anticongelantes sin gastar mucha energía en la síntesis?

La ausencia de moléculas anticongelantes en la orina de los nototenioideos señala que en su conservación debe estar implicado algún mecanismo renal. En la mayoría de los vertebrados, los anticongelantes glicopeptídicos, que son moléculas relativamente pequeñas, pasarían a la orina a través de los glomérulos renales (los haces de capilares que actúan como filtros de la sangre). La presión interna en los glomérulos suele obligar a las moléculas menores de 40.000 dalton a pasar de la sangre al sistema de túbulos que recogen la orina. En teoría, un pez con glomérulos podría recuperar los anticongelantes antes de que abandonen los túbulos: escindiendo las moléculas en elementos más pequeños (aminoácidos y azúcares), reintegrándolos a la sangre a partir de la orina y resintetizando luego los glicopéptidos. El coste, sin embargo, sería elevado: dos unidades de energía por cada enlace que se forme entre dos aminoácidos.

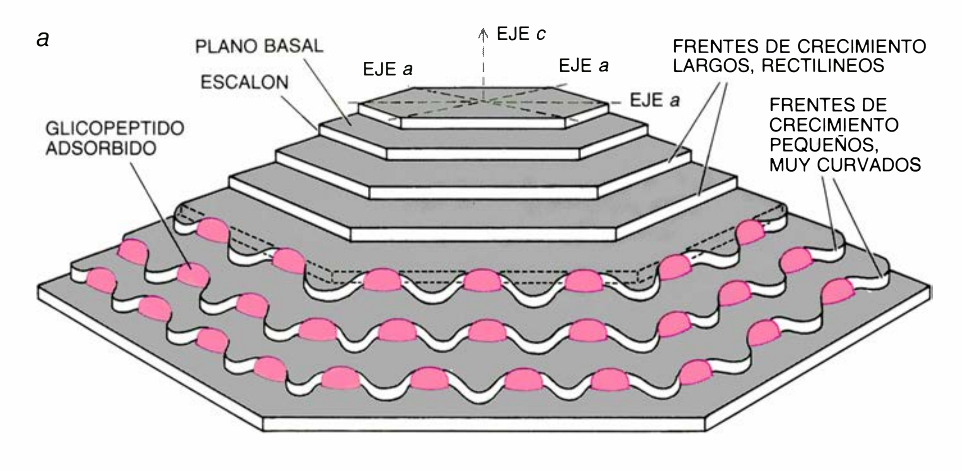
En 1972, DeVries y uno de sus alumnos, Gary H. Dobbs III, a la sazón en la Institución Scripps, examinaron al microscopio los tejidos renales de los nototenioideos. Las doce especies estudiadas carecían de glomérulos. Es más, las investigaciones efectuadas marcando las moléculas anticongelantes con isótopos radiactivos han demostrado que el riñón evita que los glicopéptidos vayan a parar a la orina. Esos peces aglomerulares producen orina mediante un proceso de secreción. Las células que tapizan las paredes de los túbulos retiran selectivamente los desperdicios de la sangre y dejan en la circulación los anticongelantes indispensables. Así se elude la necesidad de resíntesis y, por consiguiente, se ahorra energía.

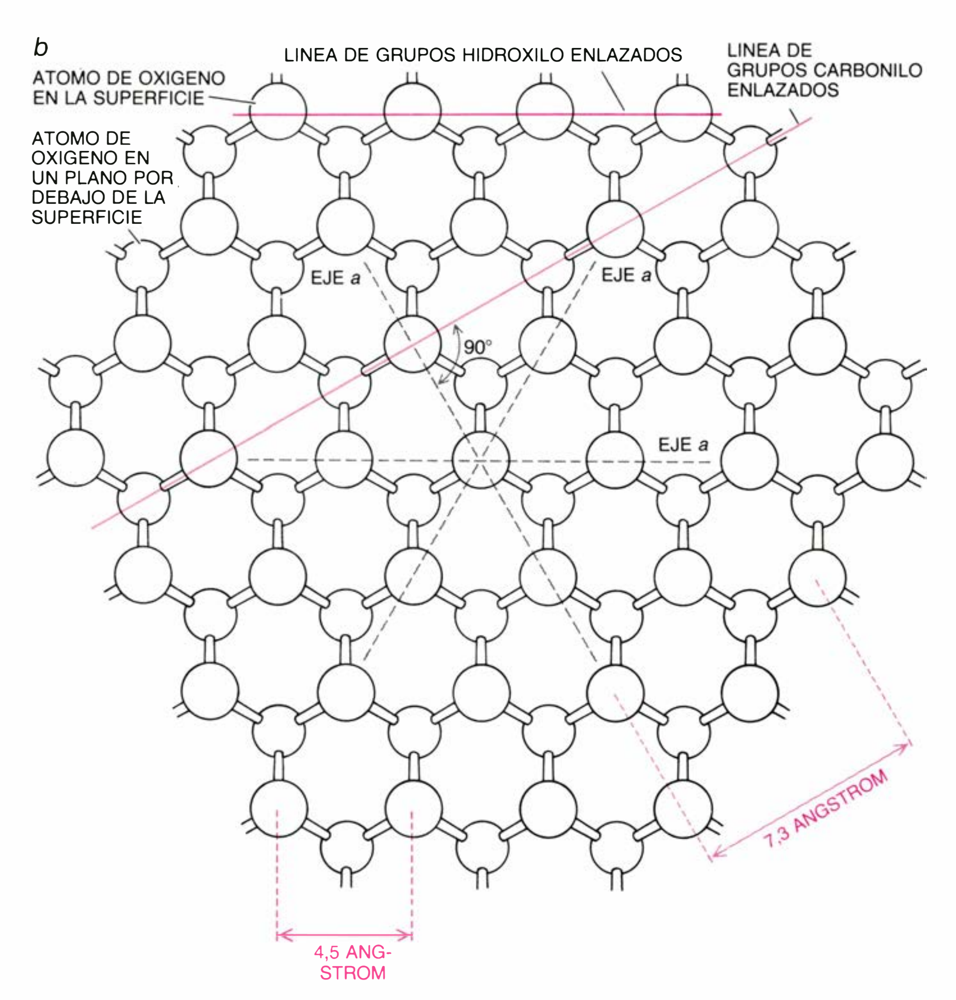
Ignoramos si la ausencia de glomérulos en el riñón de los nototenioideos del estrecho de McMurdo evolucionó específicamente para ahorrar anticongelante y energía, pero la importancia del mismo para esas funciones es coherente con tal hipótesis. Además, hemos descubierto hace poco que *Bovichthys variegatus*, una de las pocas especies de nototenioideos descubiertas en aguas templadas, presenta muchos glomérulos. Puesto que *B. variegatus* figura entre los nototenioideos menos especializados, que tenga glomérulos da a entender que su ausencia en los restantes nototenioideos constituye una adaptación especializada, adaptación que cabría imaginar desarrollada específicamente para facilitar la supervivencia en aguas frías.

La flotabilidad neutra de al menos dos especies de nototenioideos es otro ejemplo de adaptación evolutiva que les ha permitido ahorrar energía. Descubrimos esta característica hace unos diez años, al capturar varios ejemplares del mayor nototenioideo conocido: *Dissostichus mawsoni*. (Mientras que los nototenioideos suelen medir de 15 a 30 centímetros de longitud, *D. mawsoni* alcanza los 127 y pesa 28 kilogramos.) Habíamos dispuesto el sedal a una profundidad de entre 300 y 500 metros, por lo que, en un principio, supusimos que el pez ascendía desde su hábitat próximo al fondo marino para hacer presa en nuestros anzuelos. Sin embargo, nos asaltó la duda al reparar que *Dissostichus*, lo mismo que *Pleuragramma antarcticum* –la especie más pequeña de las de nototenioideos, que da razón del 70 por ciento del contenido estomacal de *Dissostichus*–, pre-




**dizado del fondo, en particular *Dissostichus mawsoni* y *Pleuragramma antarcticum*, que son peces de aguas medias que viven a profundidades de hasta 500 metros, y *Pagothenia borchgrevinki*, adaptado a la vida bajo el hielo plaquetario. *Dissostichus* es seis veces más largo y pesado que la mayoría de nototenioideos.**




**6. GLICOPEPTIDOS ADSORBIDOS al hielo; impiden probablemente el crecimiento del cristal inhibiendo la habitual propagación, en la superficie del mismo, de los escalones o capas de crecimiento del hielo (*a*). Un cristal de hielo crece cuando las moléculas de agua del líquido circundante se incorporan a los escalones en el plano basal (horizontal) del cristal. Esos escalones arrancan del centro del plano basal y suelen crecer hacia afuera, siguiendo largos frentes de borde recto (*capas superiores*). En cambio, los escalones que tropiezan con anticongelantes glicopeptídicos unidos al plano basal de un escalón inferior se dividen en muchos frentes pequeños, muy curvados y de elevada relación superficie/volumen, circunstancia que frena su crecimiento si la temperatura del líquido circundante no disminuye. Se desconoce el mecanismo exacto de enlace entre las moléculas del anticongelante y el cristal de hielo, pero se han propuesto dos opciones a la unión a la superficie del plano basal (*b*). Las moléculas de agua integradas en los cristales de hielo se disponen en anillos más o menos hexagonales, cada uno de ellos con un átomo de oxígeno (*círculos en blanco*) en cada "vértice". Los modelos moleculares indican que algunos grupos hidroxilo (—OH) de las cadenas laterales hidrocarbonadas del anticongelante están separados 4,5 angstrom, la misma distancia que media entre los átomos de oxígeno del plano basal dispuestos en filas paralelas a los ejes *a* (*color intenso*). Por otro lado, también los grupos carbonilo (—CO—) de la fracción peptídica del anticongelante podrían unirse al cristal (*color claro*). Según los modelos moleculares, en los anticongelantes glicopeptídicos que presentan una configuración completamente estirada, la distancia que separa los grupos carbonilo es de unos 7,3 angstrom, más o menos la que media entre los átomos de oxígeno del plano basal dispuestos en filas perpendiculares a los ejes *a*.**

sentaba el aspecto hidrodinámico característico de los peces de aguas medias. ¿Serían *Dissostichus* y su presa descendientes muy modificados, propios de aguas medias, del linaje nototenioideo bentónico?

En 1978 emprendimos una serie de investigaciones para determinar si esas especies flotaban lo suficiente para vivir en aguas de profundidad media y, si podían, qué adaptaciones les confería esa flotabilidad. En realidad, la flotabilidad neutra es una medida relativa, que se obtiene dividiendo el peso de un ejemplar en el agua por su peso fuera de ella y multiplicando por cien. Cuanto más próximo esté de cero, más lo estará el pez de la flotación neutra. Los resultados medios fueron de 0,1 para *Dissostichus* y de 0,6 para *Pleuragramma*: suficientemente próximos a cero para considerar que ambas especies presentan flotabilidad neutra.

La disección corroboró que, al igual que sus parientes de fondo, esas especies carecen de vejiga natatoria: la bolsa de gas que suele conferir flotabilidad neutra a los peces. ¿Qué otra razón podía explicar nuestros hallazgos? Una posibilidad obvia era la reducción del material óseo del esqueleto, por lo general el elemento más denso del cuerpo. Y a esa idea nos aplicamos con la ayuda de un vulgar cuchillo de cocina. El cuchillo atravesó fácilmente el cráneo de *Dissostichus*, compuesto en gran parte de cartílago, lo mismo que el esqueleto de la cola y la cintura torácica, otro de los huesos importantes. El cartílago es considerablemente menos denso que el hueso, lo que supone un importante ahorro de peso.

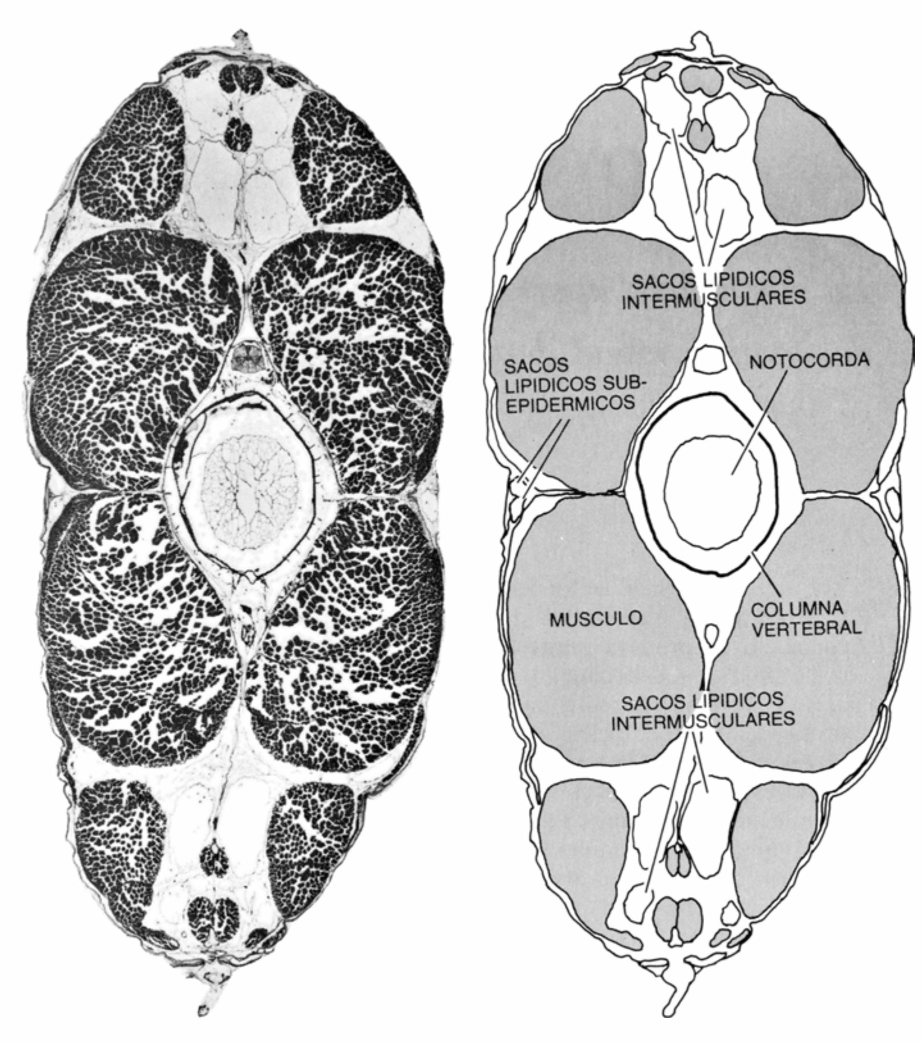
Para cuantificar el grado de mineralización del esqueleto empleamos un horno, donde se redujo a cenizas el esqueleto de *Dissostichus*, de *Pleuragramma* y de un morador de fondo, *Bovichthys*. Este procedimiento volatiliza la materia orgánica, quedando sólo el residuo mineral del esqueleto. Las cenizas esqueléticas suponían el 0,6 por ciento del peso corporal de *Dissostichus* y sólo el 0,3 por ciento del de *Pleuragramma*, en franco contraste con el 3,8 por ciento atribuido al esqueleto calcinado de *Bovichthys*.

No nos sorprendieron estos resultados, pero sí el descubrimiento siguiente. No sabemos cómo, introdujimos una burbuja de aire en la columna vertebral de un ejemplar de *Pleuragramma* parcialmente disecado; burbuja que, cuando movíamos el pez

como un tentetieso, subía y bajaba por las vértebras. En la mayoría de los peces, tal movimiento es imposible: la columna vertebral es de hueso macizo y representa el grueso del esqueleto en peso. Un examen más detenido de *Pleuragramma* reveló que sus vértebras eran esencialmente huecas: un delgado anillo de hueso rodeaba una estructura embrionaria gelatinosa (el notocordio) que persiste hasta la vida adulta.

Junto a esta reducción ósea, contribuiría asimismo a la flotación la abundancia de triglicéridos (una clase de lípidos, o grasas, menos densa que el agua marina del estrecho de McMurdo). Ambos, *Dissostichus* y *Pleuragramma*, tienen depósitos de triglicéridos, si bien de distinta morfología.

Las secciones transversales de *Dissostichus* ofrecen un aspecto brillante debido al lípido que llena las células adiposas de dos importantes depósitos: una capa subepidérmica (que representa el 4,7 por ciento del peso corporal) de dos a ocho milímetros de grueso, a modo de grasa de ballena, y un depósito más difuso (que supone un 4,8 por ciento del peso corporal) entre las fibras musculares del tronco. *Pleuragramma* presenta, en cambio, un método de retención lipídica singular entre los vertebrados: almacena sus lípidos en sacos, no en las células, que miden de 0,2 a 3 milímetros de diámetro y proliferan debajo de la piel en la región torácica, cerca del centro de gravedad. Los sacos mayores, sin embargo, se hallan entre los músculos, más metidos en el cuerpo.




**7. SECCION TRANSVERSAL de *Pleuragramma*. Revela las características que contribuyen a la flotabilidad neutra, o ingravidez en el agua. La flotabilidad neutra permite a *Pleuragramma* vivir en las aguas medias sin gastar energía en la flotación. Una característica a destacar es la presencia de sacos de lípidos. Los lípidos, o grasas, no son tan densos como el agua marina del medio que les rodea y facilitan la flotación. El notocordio de la columna vertebral de *Pleuragramma* contribuye también a la flotabilidad neutra, dado su carácter ligero; en la mayoría de los peces óseos, las vértebras son de hueso macizo y muy pesadas. (La fijación del material para la observación microscópica ha contraído el notocordio en relación al hueso.)**

Todavía no hemos definido con exactitud las ventajas relativas de almacenar lípidos en sacos en vez de hacerlo en células adiposas. En un principio creímos que los sacos lipídicos no tenían otro objeto que el de conferir flotabilidad, y que su contenido de grasa no se aprovechaba como fuente de energía; *Pleuragramma* tiene pocas células adiposas, que parecían de gran importancia en la regulación de la remoción de lípidos. En fecha más reciente hemos descubierto que las células musculares contiguas a los sacos poseen grandes vacuolas, o cavidades membranosas, que pueden albergar triglicéridos. ¿Será que los músculos añaden lípido a los sacos para flotar y lo retiran, asimismo, cuando están faltos de energía? Intentaremos someter a ensayo esta hipótesis en nuestro próximo viaje a la estación biológica del estrecho de McMurdo.

La reducción del esqueleto y la acumulación de lípidos, sumadas, pueden dar razón de la baja densidad y la flotabilidad neutra de *Dissostichus* y *Pleuragramma*. A su vez, la liviandad facilita la explotación de las aguas medias, infrautilizadas, del Antártico. A decir verdad, es ahí donde abundan ambas especies y donde gozan de una amplia distribución. De *Pleuragramma*, por ejemplo, se sabe que es la especie dominante en los mares de Ross y de Weddell, lo mismo que en las aguas del estrecho de McMurdo.

Las adaptaciones que han permitido a los nototenioideos propagarse por las aguas medias son fascinantes desde un punto de vista anatómico, pero sorprenden también por sus consecuencias ecológicas. Es hora de que revisemos las ideas al uso sobre la red alimentaria en dichas aguas. Según se afirma de ordinario, la red es breve, figurando en ella sólo vida plantónica vegetal, krill (un crustáceo parecido a la quisquilla), focas y ballenas. Hemos demostrado, como también lo han hecho otros investigadores, que debería ampliarse la visión actual de la composición y complejidad de la red alimentaria, para incluir los nototenioideos que flotan, y quizá también otros organismos. En realidad, en las áreas del océano Antártico donde escasea el krill *Pleuragramma* puede ocupar el lugar de aquél en la red alimentaria. Por último, desde otro punto de vista, confiamos en que nuestras investigaciones sobre la flotabilidad y los anticongelantes brinden un atisbo del alcance extraordinariamente amplio de la adaptación y la evolución habidas en el extremo más frío del espectro ambiental: un dominio que otrora fue considerado incompatible con una vida marina significativa.

# Características y objetos del procesamiento visual

*La capacidad, aparentemente natural, de percibir conjuntos significativos del mundo visual depende de procesos complejos. Las características que se extraen de modo automático de una escena se agrupan en objetos*

Anne Treisman

Si por arte de magia el lector fuera transportado a una ciudad desconocida, su primera impresión sería la de objetos reconocibles y organizados de forma coherente en un contexto lógico. Vería edificios, gente, automóviles y árboles. Detectaría, sin un empeño especial por su parte, colores, contornos, movimientos y distancias, y los aunaría en conjuntos pluridimensionales, asimilables a objetos y nombres conservados en la memoria. Dicho de otro modo, los conjuntos significativos parecen preceder a las partes y propiedades, como subrayaron los psicólogos de la forma, o gestaltistas, hace ya muchos años.

Este acto, realizado sin esfuerzo aparente, que repetimos innumerables veces en nuestras horas de vigilia, resulta ser de difícil interpretación o simulación en un ordenador (mucho más difícil, en efecto, que la comprensión y simulación de tareas que la mayoría considera de especial complejidad, como jugar al ajedrez o resolver problemas de lógica, por ejemplo). La percepción de conjuntos coherentes en el mundo visual depende, según parece, de complejos procesos a los que el individuo no tiene acceso consciente, procesos cuya existencia se deduce de pruebas indirectas.

Ello no obstante, comienzan a formularse algunas generalizaciones sencillas sobre el procesamiento de la información visual. Una de ellas es la distinción entre dos niveles de procesamiento. Ciertos aspectos del tratamiento visual parecen realizarse simultáneamente (es decir, de una sola vez para la totalidad del campo visual) y automáticamente (esto es, sin concentrar la atención en ninguna parte de dicho campo visual). Otros aspectos del procesamiento visual parecen depender de la concentración de la atención y se realizan en serie, uno después de otro, como si un foco de luz mental se desplazara de un punto a otro.

En 1967, Ulric Neisser, a la sazón en la Universidad de Pennsylvania, propuso que, en el procesamiento visual, un nivel de "atención previa" segregaba, o separaba, las regiones de una escena en figuras y entorno, para que otro nivel de atención posterior identificara objetos específicos. En fecha más reciente, David C. Marr, que estudiaba la simulación de la visión por ordenador en el Instituto de Tecnología de Massachusetts, concluyó que era necesario establecer un "bosquejo fundamental": una primera fase de procesamiento en la que la luz que llega a un sistema de receptores se convierte en una descripción codificada de líneas, puntos o perfiles y de sus ubicaciones, orientaciones y colores. La representación de superficies y volúmenes, y en última instancia la identificación de objetos, comenzaría después de esa codificación inicial.

Resumiendo, entre los psicólogos, fisiólogos e informáticos va ganando aceptación un modelo de dos o más fases. La primera de éstas puede describirse como la extracción de características a partir de las configuraciones de luz; las fases posteriores se ocuparían de la identificación de objetos y de su entorno. La expresión "características y objetos" describe, por tanto, en tres palabras la hipótesis emergente acerca de las fases iniciales de la visión.

Hay varias razones, en mi opinión, para aceptar que, efectivamente, el procesamiento visual se sirve de analizadores especializados que descomponen el estímulo en partes y propiedades, y estar de acuerdo, asimismo, en que se necesitan operaciones adicionales para especificar su recombinación en sus conjuntos correctos. En parte, las pruebas son de carácter fisiológico y analítico.

En concreto, el esfuerzo por establecer qué les sucede a los datos sensoriales sugiere que éstos se procesan en campos diferentes, de gran especialización. Uno de los campos se ocupa principalmente de la orientación de líneas y bordes; otro del color y, un tercero, de direcciones y movimiento. Sólo después llegan los datos a áreas que, según parece, identifican los objetos naturales complejos.

Otras pruebas son de conducta. Por ejemplo, parece que la adaptación visual (la tendencia del sistema visual a no responder ante un estímulo sostenido) se produce, por separado, para las diferentes propiedades de una escena. Si se mira fijamente una catarata durante unos minutos y se gira después la vista hacia el borde del río, parecerá que éste fluye en sentido opuesto. Es como si los detectores visuales se hubieran adaptado selectivamente a un sentido particular del movimiento, independiente de *lo* que se mueve. El as-

**1. EL CONOCIMIENTO PREVIO actúa de guía en la percepción visual. Así se comprueba pidiendo a los sujetos de un ensayo que identifiquen un objeto familiar en una fotografía de una escena ordinaria (*arriba*) o en una mezcla de fragmentos de la escena (*abajo*). La tarea consistía en hallar la bicicleta. En la imagen mezclada la búsqueda tendía a ser más larga. De lo que cabe deducir que el conocimiento del mundo (en este caso la ubicación propia de las bicicletas en un entorno urbano) acelera la percepción y la hace menos susceptible a error. Ciertos aspectos iniciales del proceso de la información sobre los que descansa la percepción visual parecen, no obstante, producirse automáticamente: sin la influencia del conocimiento previo. La ilustración se concibió a partir de los ensayos de Irving Biederman, de la Universidad estatal de Nueva York.**

VISITOR
PERMIT
REQUIRED

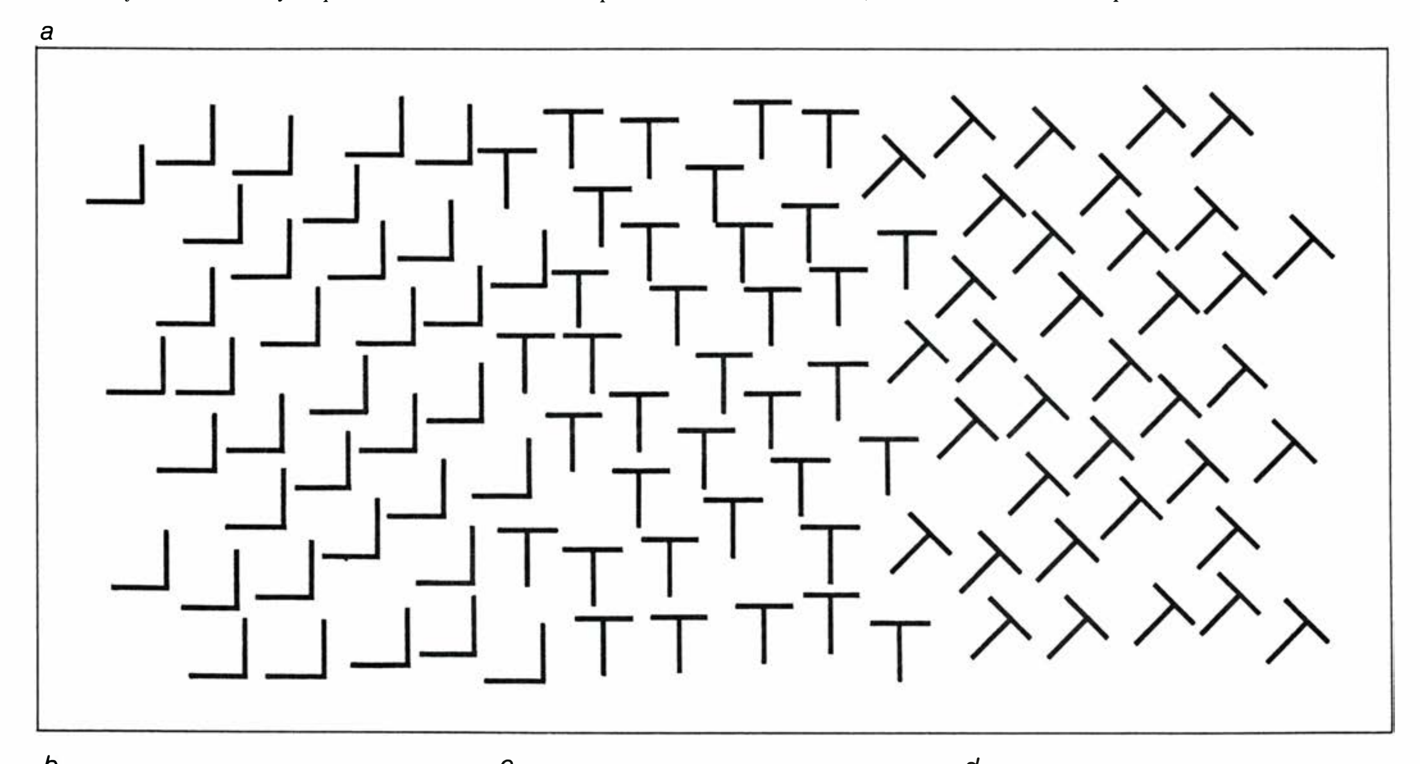
pecto de la ribera nada tiene que ver con el del agua, pese a lo cual acusa los postefectos derivados del proceso de adaptación.

¿Cómo someter a ensayos de laboratorio la fracción del procesamiento visual en la que intervenga la atención previa? Una de las estrategias nos la sugiere el hecho evidente de que, en el mundo real, las partes que pertenecen al mismo objeto tienden a compartir propiedades: poseen el mismo color y textura, sus bordes muestran una continuidad de líneas y curvas, se mueven al mismo tiempo y se hallan aproximadamente a la misma distancia del ojo. Así, el investigador puede pedir a los sujetos de ensayo que localicen los límites entre regiones de varias representaciones visuales, lo que le informará sobre qué propiedades determinan que un límite sobresalga inmediatamente. Tales propiedades probablemente sean las que suele explotar el sistema visual en su tarea inicial de segregar la figura de su entorno.

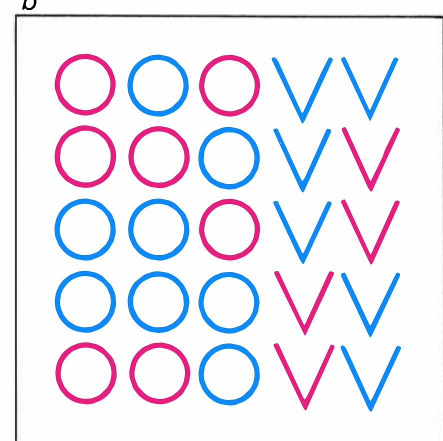
Se ha comprobado que los límites sobresalen entre elementos que difieren en rasgos simples –color, brillo y orientación de líneas–, pero no entre elementos que difieren en la combinación o disposición de esas características [*véase la figura 2*]. Por ejemplo, un campo de letras T se distingue bien de otro campo de letras T ladeadas, aunque no de un campo de letras L, trazadas con los mismos componentes que las T (una línea horizontal y otra vertical). Por la misma razón, una mezcla de letras V azules y de letras O rojas no se segrega bien de una mezcla de V rojas y O azules. Parece que el "análisis" inicial del campo visual atiende a cada rasgo por separado y no a las posibles combinaciones de las características. Es decir, el análisis de propiedades y partes es anterior a su síntesis. Y si las partes o propiedades se identifican antes de que se asocien a objetos, deberán poseer alguna existencia psicológica independiente.

Lo cual nos lleva a predecir que, en ocasiones, se producirán errores de sín-

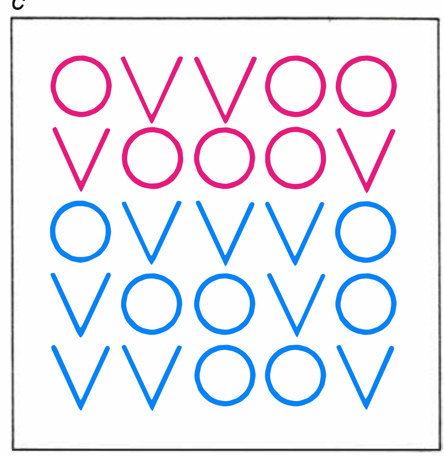
*a*



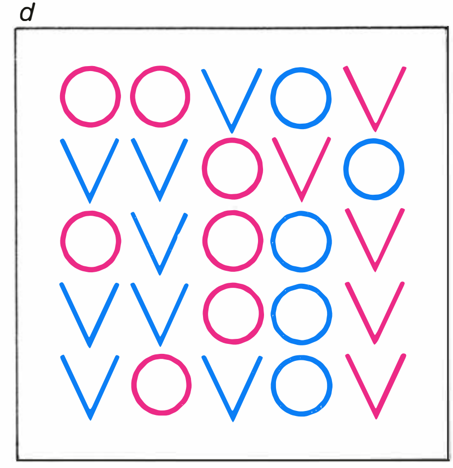
*b*



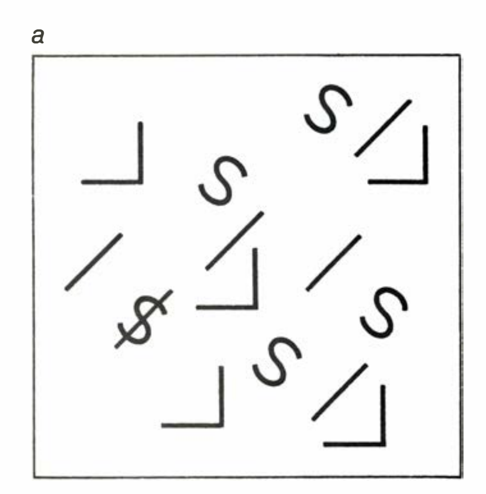
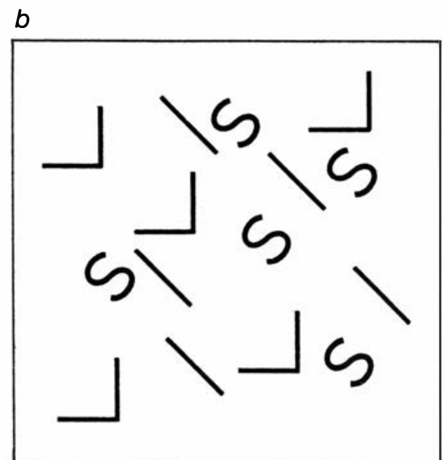
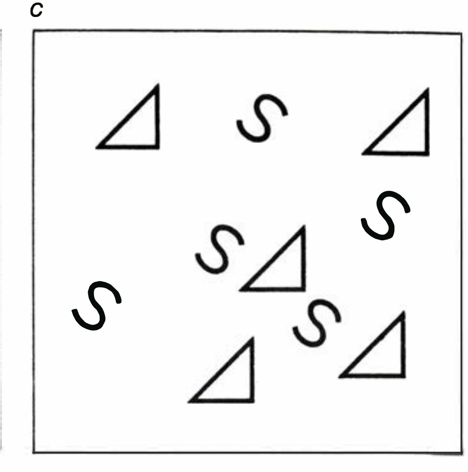
*c*



*d*



**2. LIMITES QUE "SALTAN" de una escena y que probablemente revelen las propiedades sencillas, o características, del mundo visual captadas en la fase inicial del proceso visual. Por ejemplo, se percibe una demarcación entre las T y las T ladeadas, pero no entre las T y las L (*a*). Se deduce de ello que la orientación de las líneas es una característica importante en el proceso visual inicial, mientras que las disposiciones particulares de conjunciones de líneas no lo son. Destaca un límite de separación entre las O y las V (*b*), que denota la importancia de las propiedades simples de la forma (como la curvatura). También se perciben separadas las formas rojas y azules (*c*), de lo que se infiere la importancia del color. No resalta, en cambio, ningún límite entre combinaciones de forma y color, en este caso de letras V rojas y O azules, en oposición a O rojas y V azules (*d*). A lo que parece, la visión inicial solamente considera rasgos individuales.**

**3. PERCEPCION DEL SIMBOLO DEL DOLAR, que constituye un ejemplo de una falsa asociación de características. Se pidió a los sujetos que buscaran símbolos del dólar entre letras S y segmentos lineales (*a*). A menudo creían verlos en presentaciones breves que no los contenían (*b*). Con frecuencia comparable caían en el mismo error cuando la línea necesaria para completar el símbolo se hallaba encastrada en un triángulo (*c*). El experimento sugiere que el proceso visual inicial detecta la presencia de características independientemente de su situación. Las líneas del triángulo se perciben como componentes aislados.**

tesis. En otras palabras, el individuo verá a veces conjunciones ilusorias de partes o características extraídas de áreas diferentes del campo visual. Bajo ciertas condiciones, tales ilusiones se producen a menudo. En un experimento realizado por el autor y sus colegas se proyectaban tres letras de color, por ejemplo una X azul, una T verde y una O roja, durante 200 milisegundos, esto es, un quinto de segundo, a la vez que se distraía a los sujetos pidiéndoles que dijeran primero el número que aparecía a ambos lados de la letra y luego las letras de color. En un tercio de los experimentos, los sujetos daban por respuesta una combinación errónea de letras y colores; por ejemplo, una X roja, una O verde y una T azul.

La frecuencia de esos errores de combinación era muy superior a la frecuencia con que se informaba de un color o forma que no se hallaba en la representación, señal de que los errores reflejaban intercambios genuinos de propiedades, y no falsas percepciones de un objeto. Muchos de esos errores parecían verdaderas fantasías, tan convincentes que los sujetos exigían ver la representación de nuevo para admitir que se habían equivocado.

Hemos investigado la existencia de límites a la presentación de tales conjunciones ilusorias. Nos hemos preguntado si, para intercambiarse las propiedades de los objetos, éstos deben ser similares. No parece que sea así: los sujetos intercambiaban los colores del peo contorno rojo de un triángulo y un círculo relleno de azul con la misma facilidad con la que intercambiaban los colores de dos pequeños contornos triangulares. Se diría que el color rojo del triángulo se encuentra representado por un código abstracto para el rojo, y no que se encuentra asociado a una especie de análogo del triángulo que también codifique el tamaño y forma del objeto.

Nos preguntamos también si resultaría más difícil crear combinaciones ilusorias separando una porción de una forma unitaria simple, un triángulo, por ejemplo, que moviendo una línea suelta. Una vez más, la respuesta fue negativa. Los sujetos veían símbolos imaginarios del dólar en una presentación de letras S y líneas. Vieron también esos símbolos en una representación de letras S y triángulos cuando uno de los lados de los triángulos coincidía con las líneas requeridas por la ilusión [*véase la figura 3*]. En la experiencia consciente, el triángulo se percibe como tal. Sin embargo, en el nivel de atención previa, sus líneas componentes parecen detectarse independientemente.

Sin duda, el triángulo poseería alguna peculiaridad adicional, a saber, que sus líneas constitutivas encierran un área, y esa propiedad de cierre podría detectarse en la atención previa. Si tal es el caso, la percepción de un triángulo podría requerir la detección de sus tres líneas componentes en las orientaciones correctas, así como la detección del cerco. Entonces, los sujetos no habrían de percibir triángulos ilusorios cuando se les presentara sólo las líneas, separadas de los triángulos, en sus orientaciones correctas. Precisarían un estímulo adicional, una forma cerrada diferente (quizás un círculo), para así formar triángulos ilusorios. Y eso es, en efecto, lo que hallamos.

Otro modo de someter a investigación de laboratorio el nivel de atención previa del proceso visual consiste en asignar tareas de búsqueda visual. Se pide a los sujetos participantes que hallen un objeto entre otros que estimulan su distribución. El supuesto es que, si el proceso de atención previa se produce automáticamente y a través del campo visual, en su representación de atención previa en el cerebro todo objeto que difiera de los que le rodean debe "saltar" a la vista. Cuesta encontrar una aguja en un pajar porque comparte las propiedades de longitud, grosor y orientación con la paja que la rodea. Cuesta mucho menos descubrir una amapola, pues su color y su forma destacan inmediatamente.

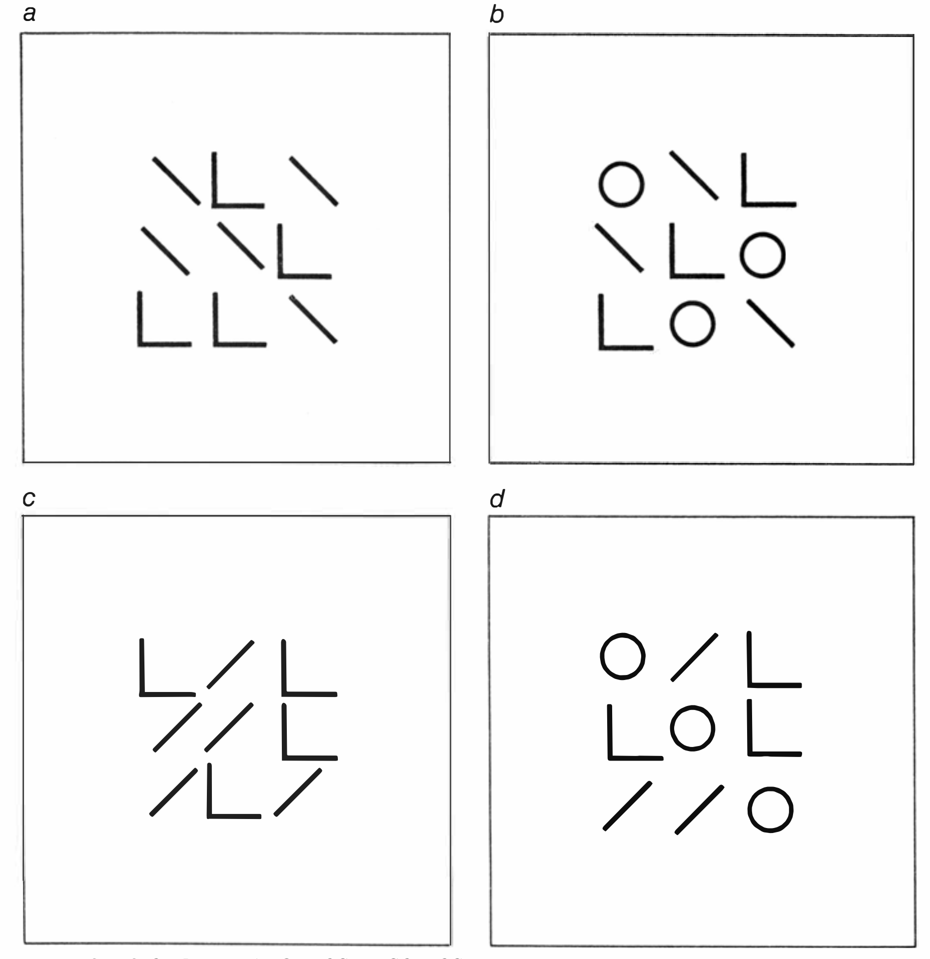
Comprobamos que, si un objeto difería de los señuelos en alguna propiedad elemental (verbigracia, su orientación, color o curvatura), la rapidez con que se detectaba en un grupo de 30 objetos era parecida a la mostrada en otro de 3 objetos solamente. Esos objetos "saltan" de la representación, de tal forma que el tiempo que requiere encontrarlos es independiente del número de los elementos de distracción que los rodeen. La independencia se mantiene aun cuando no se informe a los sujetos sobre la propiedad que distingue al objeto. Los sujetos emplean entonces algo más de tiempo en la búsqueda, si bien el número de elementos de distracción apenas ejerce efecto alguno si es que lo produce.

Ahora bien, cuando el objeto se caracterizaba sólo por su conjunción de

propiedades (una O roja entre N rojas y O verdes), o se definía sólo en razón de su combinación particular de componentes (una R entre varias P y Q, que, juntas, incorporan todas las partes de la R), el tiempo invertido en hallar el objeto o en confirmar su ausencia aumentaba linealmente con el número de señuelos presentados. Es como si se forzara, a los sujetos sometidos a esas circunstancias, a fijar la atención alternativamente en cada objeto de la representación para determinar la forma en que se han asociado las propiedades del objeto. En una prueba positiva (ensayo en el que sí se muestra el objeto), la búsqueda termina con el hallazgo del mismo; por lo general, la búsqueda concluye cuando se ha examinado la mitad de los elementos de distracción. En una prueba negativa (en la que el objeto no se halla presente) tienen que comprobarse todos los elementos de distracción. A medida que se añaden elementos que contribuyen a la distracción, el tiempo de búsqueda aumenta, en las pruebas positivas, la mitad de lo que se incrementa en las pruebas negativas.

La diferencia entre la búsqueda de características simples y la búsqueda de conjuntos de características podría tener implicaciones en el ámbito industrial. Pensemos en los controles de calidad; quizás se tarde más en dar el visto bueno a un producto si los posibles errores de fabricación se caracterizan por combinaciones de propiedades defectuosas que si los errores se traducen siempre en un cambio conspicuo de una sola propiedad. De igual modo, los símbolos que representan, por ejemplo, los puntos de destino de los equipajes que se manejan en una terminal de aeropuerto deberían caracterizarse por una combinación única de propiedades.

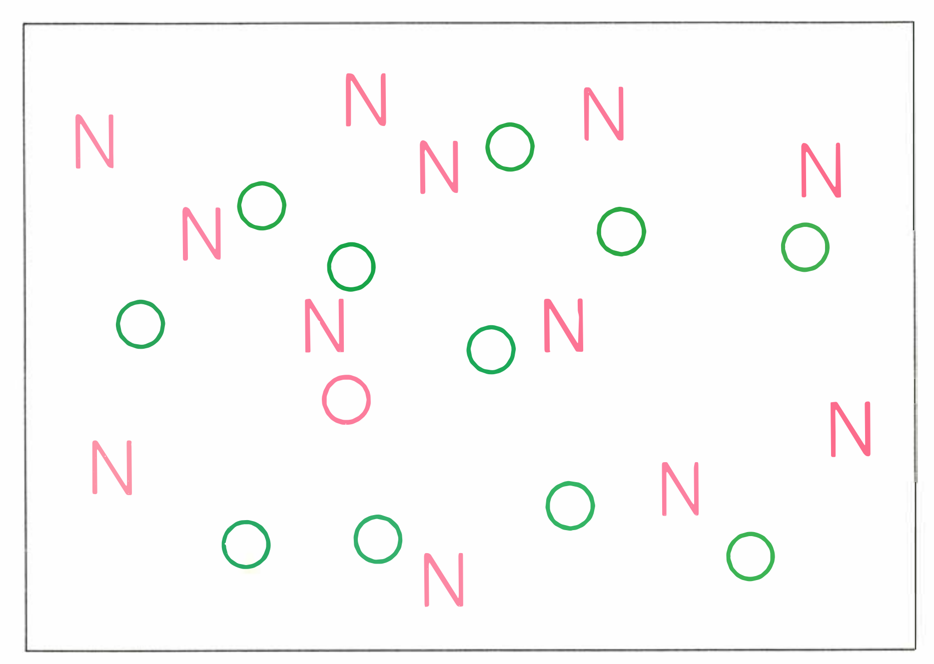
En otra serie de experimentos sobre tareas de búsqueda visual exploramos el efecto resultante de intercambiar el objeto y los elementos de distracción. Requerimos de los sujetos que hallaran un objeto caracterizado por *carecer* de una propiedad que sí presentaban los señuelos. Empleábamos representaciones consistentes en varias letras O y Q, de tal forma que la diferencia entre el objeto y los elementos de distracción se limitaba a que el primero no era más que un anillo mientras que el segundo era el mismo anillo cortado por una recta [*véase la figura 6*]. Hallamos una notable diferencia en el tiempo de búsqueda entre los ensayos en los que el objeto era la letra Q y aquellos en que había que localizar la O. Cuando el objeto tenía la línea, el tiempo de búsqueda era independiente del número de elementos de distracción. El objeto "saltaba" de la representación, sin duda. Cuando carecía de la línea de corte, el tiempo de búsqueda aumentaba linealmente con el número de elementos de distracción: los objetos de la representación se sometían a una búsqueda en serie.

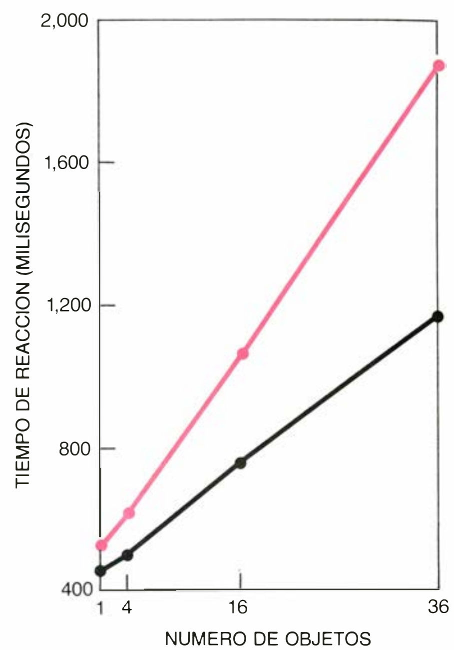



**4. PERCEPCION DE TRIANGULOS ILUSORIOS, que constituyen una evaluación de las características necesarias para apoyar la percepción de triángulos. Los sujetos raramente creían ver un triángulo cuando se exhibían brevemente ante ellos segmentos lineales que lo formaban (*a*). Los veían mucho más a menudo cuando las presentaciones también incluían estímulos cerrados, es decir, formas que encerraban un espacio, en este caso la letra O (*b*). Evidentemente, la forma cerrada es una de las características analizadas en el proceso visual inicial. Conclusión que quedó reforzada en la presentación de imágenes en las que faltaba la línea diagonal orientada para encajar en el triángulo (*c*, *d*). Los sujetos raramente los veían en esas escenas.**

El resultado va en contra de lo que dicta la intuición. En efecto, en ambos casos se trata de distinguir los mismos estímulos: O y Q. No obstante, el resultado está en armonía con la idea de que, al iniciarse el proceso visual, una señal nerviosa compuesta informa de la presencia, pero no de la ausencia, de una característica distintiva. En otras palabras, la visión inicial extrae propiedades simples y cada tipo de propiedad genera la actividad de poblaciones de detectores especializados. Un objeto dotado de una propiedad característica inmersa entre elementos de distracción se descubre sin más que comprobar si los detectores pertinentes se hallan en activo. Por el contrario, un objeto que carezca de una propiedad que sí exhiban los elementos de distracción genera una actividad sólo ligeramente inferior a la instada por una representación formado en su totalidad por señuelos. Proponemos, por tanto, que la visión inicial establece lo que podríamos llamar mapas de características. No tienen necesariamente que considerarse análogos a las áreas visuales especializadas que reconocen los psicológos, si bien la correspondencia es sugestiva.

Explotamos tareas de búsqueda visual para someter a ensayo una amplia gama de características que, a nuestro juicio, habrían de destacarse en las representaciones, lo que las definiría como primitivas: elementos básicos del lenguaje de la visión inicial. Los can-




**5. BUSQUEDA DE UN OBJETO definido por una combinación de características. Se emplea tanto más tiempo cuantos más elementos "de distracción" contiene la escena. Aquí el objeto es una O roja; los señuelos son O verdes y N rojas. Por tanto, el objeto difiere de los elementos de distracción, en su combinación de forma y color. En las pruebas efectuadas sin mostrar el objeto, el tiempo medio de búsqueda aumentaba unos 40 milisegundos por cada elemento distractor añadido a la escena. En las que sí se mostraba el objeto (con lo que, por término medio, debía revisarse la mitad de las figuras para hallarlo), el incremento del tiempo de búsqueda era, aproximadamente, de la mitad: la búsqueda de un objeto caracterizado por una combinación dada de rasgos exige concentrar la atención sucesivamente en cada figura representada. Si el objeto posee forma o color únicos, el número de señuelos no afecta al tiempo de búsqueda.**

didatos se agrupaban en varias categorías: propiedades cuantitativas, como la longitud o el número; propiedades de líneas aisladas, como orientación o curvatura; propiedades de disposición de líneas y propiedades topológicas y de relación, como la interconexión de las líneas, la presencia de extremos de línea sin conectar o la relación existente entre altura y anchura de una forma.

Entre los candidatos cuantitativos, mis colegas y yo hallamos que algunos objetos saltaban a la vista cuando presentaban una resaltada virtualidad discriminatoria. En particular, cuanto más conspicuos eran los objetos –de líneas más largas, de grises más oscuros y de pares de líneas (cuando los elementos de distracción eran líneas aisladas)– tanto más fácil resultaba detectarlos. De lo que se infería que el sistema visual respondía positivamente a la presencia de "más" en esas propiedades cuantitativas, y que la posesión de "menos" se codificaba por defecto. Por ejemplo, quizá la actividad nerviosa que señalaba la longitud de la línea aumentaba en proporción a la longitud (hasta un cierto máximo), de tal forma que se detectaba el objeto más largo frente al nivel, más bajo, de actividad de fondo instada por elementos de distracción cortos. Por el contrario, el objeto corto, que desencadenaría una tasa de "disparo" menor, quedaba, probablemente, abrumado por la mayor actividad generada por los elementos de distracción, aquí más largos. Los psicofísicos saben desde hace más de un siglo que la capacidad de distinguir diferencias de intensidad se agudiza a medida que disminuye la intensidad del fondo. Proponemos que ese mismo fenómeno, conocido por ley de Weber, podría explicar nuestros hallazgos relativos a las características de tipo cuantitativo.

Nuestros ensayos sobre dos propiedades elementales de las líneas, orientación y curvatura, produjeron algunas sorpresas. En ambos casos, logramos que destacara un objeto, una línea inclinada entre motivos de distracción verticales y una recta rodeada de curvas; pero la situación inversa (una línea vertical entre motivos de distracción inclinados y una línea recta entre curvas) no hacía resaltar el objeto. Hallazgo que sugería que la visión inicial codificaba inclinación y curvatura, pero no verticalidad ni trazo rectilíneo. Es decir, tanto los objetos verticales como los rectos parecen carecer de una característica que poseen los elementos de distracción, como si representaran valores nulos en sus respectivas dimensiones. Si nuestra interpretación es correcta, puede inferirse que, en la visión inicial, inclinación y curvatura se representan de modo relacional, como desviaciones de una norma que, en sí, no está positivamente señalada.

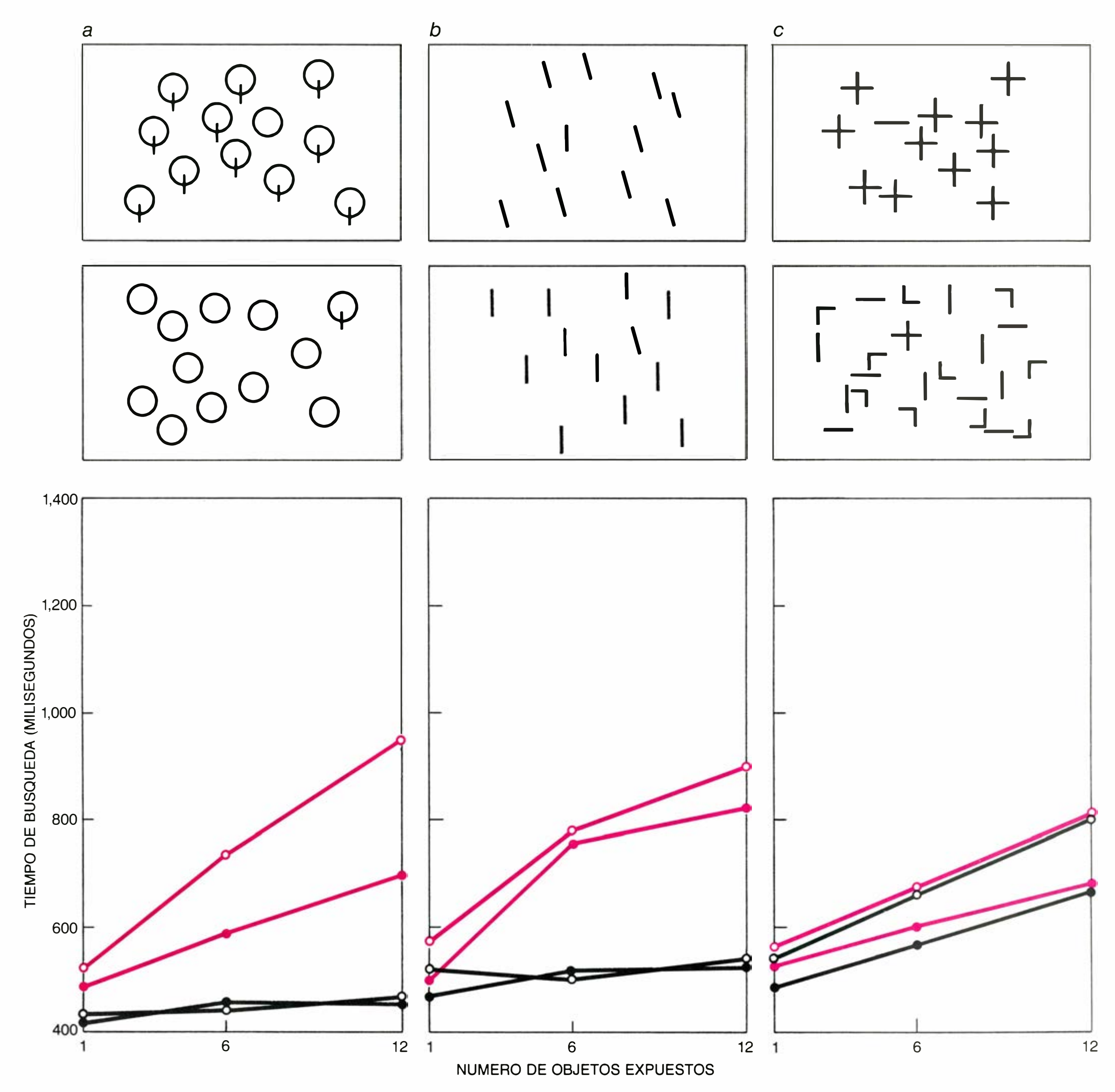
La propiedad de cierre nos conduce a una conclusión similar. Se pidió a los sujetos que buscaran anillos cerrados entre otros abiertos y círculos sin cerrar entre círculos cerrados. También aquí se advirtió una asimetría sorprendente, señal, esta vez, de que en el proceso de atención previa se detectaba la abertura, pero no el cierre; o mejor: en el proceso de atención previa se detectaba el cierre si los elementos de distracción presentaban aberturas muy grandes (es decir, cuando se trataba de formas muy abiertas, como semicírculos, por ejemplo). Dicho de otro modo, sólo resulta detectable la forma cerrada en el proceso de atención previa cuando los señuelos no la presentan de modo significativo. Por el contrario, las aberturas (o los extremos de línea creados por ellas) se detectan con igual facilidad cualquiera que sea su envergadura (salvo que sean demasiado pequeñas para que el sujeto, que emplea visión periférica, las advierta).

Finalmente, no hallamos indicio alguno de que propiedades de la disposición de las líneas resultaran detectables en el proceso de atención previa. Se ensayaron intersecciones, uniones, líneas paralelas y líneas convergentes. En todos los casos se comprobó que, a medida que aumentaba el número de señuelos, crecía el tiempo de bús-

queda. Los objetos resaltaban sólo cuando la atención del sujeto se concentraba en ellos; no sobresalían automáticamente si la atención se diseminaba por la ilustración.

Resumiendo: según parece, en el proceso visual inicial sólo se extrae un pequeño número de características, a saber, color, tamaño, contraste, inclinación, curvatura y extremos de línea. La investigación efectuada por otros profesionales prueba que también se extraen automáticamente en la visión inicial el movimiento y las diferencias de profundidad estereoscópica. En general, los elementos constitutivos de la visión parecen ser propiedades simples que caracterizan elementos locales, así puntos o líneas, pero no sus relaciones recíprocas. De las propiedades que saltan a la vista durante la atención previa, la más compleja sería la del cierre de la forma. Finalmente, nuestros hallazgos sugieren también que varias propiedades del proceso de atención previa se codifican a modo de valores de desviación respecto de un valor nulo, o de referencia.

Hasta aquí me he concentrado en las fases iniciales, de atención previa, de la visión. Revisemos ahora las fases posteriores. Insistiré en probar que, para asociar las características de un punto determinado de una escena, y para establecer representaciones es-



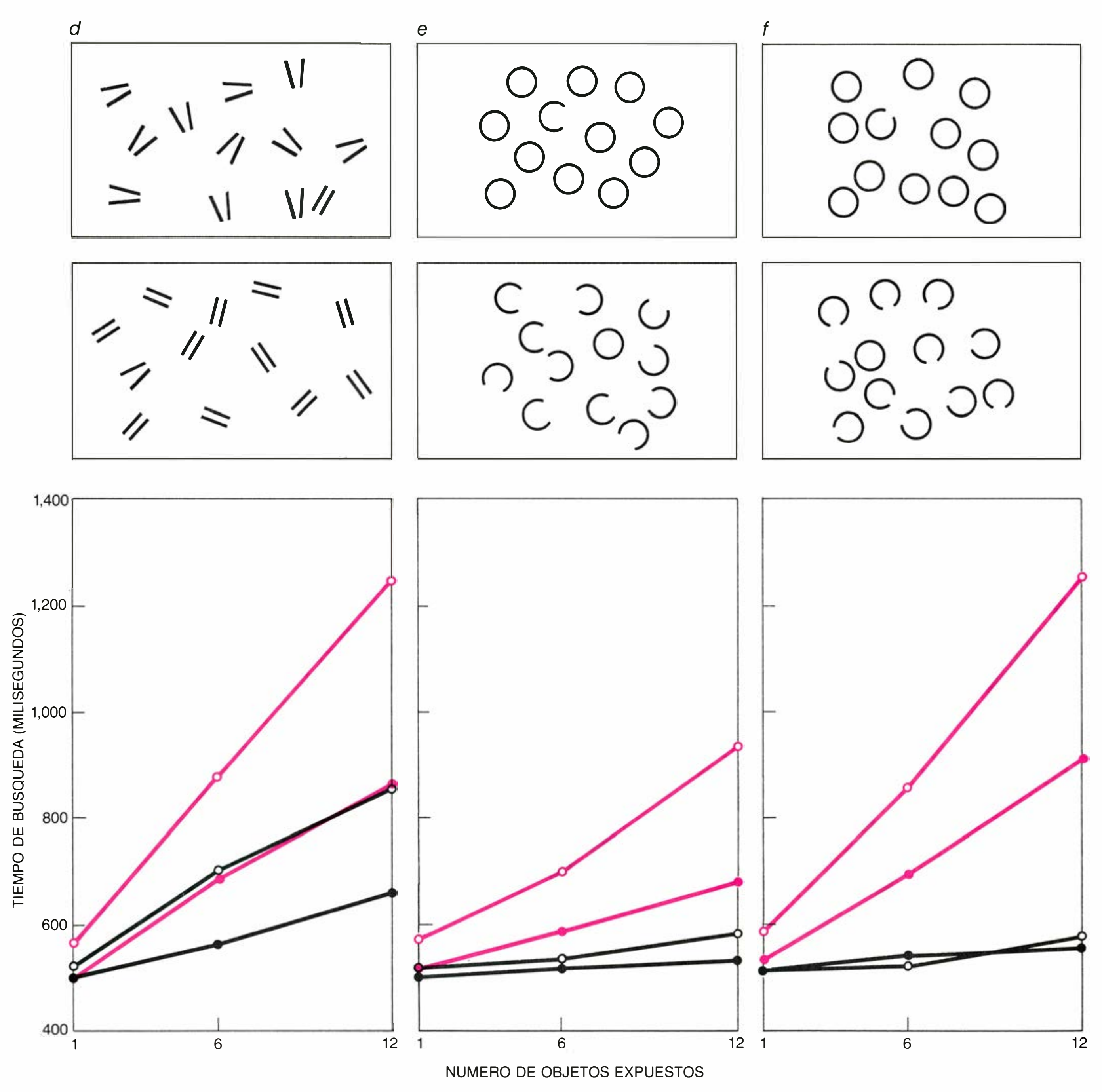

**6. LA PRESENCIA O AUSENCIA de una característica puede afectar de modo muy distinto al tiempo requerido para hallar un objeto rodeado de elementos distractores. En un experimento (*a*), la figura a reconocer era un anillo cortado por una pequeña línea vertical o un anillo sin tal característica. El tiempo de búsqueda del círculo cortado (*negro*) demostró ser, en general, independiente del número de elementos de la ilustración, señal de que la característica saltaba a la vista. El tiempo de búsqueda del otro círculo (*color*) aumentaba bruscamente a medida que se añadían elementos de distracción, señal de que se realizaba una inspección en serie de las figuras. En un segundo experimento (*b*) se pedía a los participantes que buscaran una línea vertical (*color*) o una línea inclinada (*negro*). La línea inclinada se hallaba mucho más deprisa; según parece, sólo resalta ésta. En un tercer experimento (*c*) se comparaba la localización de un segmento**

tructuradas de objetos y de sus relaciones, se requiere concentrar la atención.

Una línea de experimentación que sugiere que las conjunciones requieren atención partía de ensayos en los que se pedía a los sujetos que identificaran un objeto de una representación y describieran su localización. En una prueba, el objeto sólo se distinguía de los señuelos en una característica sencilla. Por ejemplo, el objeto era una H roja rodeada de O rojas y X azules; o una X naranja entre O rojas y X azules. En otros despliegues, el objeto sólo difería por su combinación de rasgos: era una O azul o una X roja entre O rojas y X azules.

Nos interesaban particularmente aquellos casos donde los sujetos identificaban correctamente el objeto aunque lo situaban erróneamente. Como esperábamos, a veces los sujetos lograban identificar un objeto simple, por ejemplo, que se distinguiera por su color, sin alcanzar a ubicarlo correctamente. Situación que difería en los objetos de combinación de rasgos: la identificación correcta dependía de que se localizara bien. En efecto, según parece, para combinar las características de un punto, la atención debe antes centrarse en él.

Por supuesto, en una escena natural el conocimiento previo descarta muchas combinaciones de características. Difícilmente veremos plátanos azules o




**lineal aislado (*color*) con la de dos líneas cruzadas formando un signo más (*negro*). Ninguno de los dos saltaba a la vista. En un cuarto experimento (*d*) se ensayaban líneas paralelas (*color*) frente a líneas convergentes (*negro*). Tampoco resaltaban. En la quinta prueba (*e*) se ensayaron círculos cerrados (*color*) frente a círculos con una abertura de un cuarto de su circunferencia (*negro*). En el sexto (*f*) se contrastó nuevamente la forma cerrada (*color*) con círculos de aberturas menores (*negro*). El tamaño de la abertura no parecía ejercer efecto alguno: el anillo incompleto siempre saltaba a la vista. Por el contrario, costaba más detectar los círculos completos a medida que se reducía el tamaño de las aberturas en los elementos de distracción. En las gráficas, los puntos vacíos corresponden a datos obtenidos en ensayos en los que las presentaciones sólo incluían elementos de distracción (pruebas negativas). (Los dibujos son obra de Jerome Kuhl.)**

huevos con pelo. El proceso visual con atención previa podría denominarse "ascendente", en razón de que se desarrolla automáticamente. En concreto, se produce sin recurrir a limitaciones "descendentes". Cabe aventurar que, en la vida ordinaria, se evitan las combinaciones fantasiosas cuando se oponen a expectativas "descendentes". Se ha demostrado reiteradamente que aplicamos nuestro conocimiento del mundo para acelerar la percepción y hacerla más ajustada. Así, en un ensayo, Irving Biederman, de la Universidad estatal de Nueva York en Buffalo, pidió a los sujetos que localizaran una bicicleta en una fotografía de una escena natural y en una imagen montada mezclando al azar porciones de la anterior. El éxito fue mayor cuando se les ofrecía el contexto natural [*véase la figura 1*].

Para explorar la función del conocimiento previo en la asociación de propiedades, Deborah Butler y el autor realizaron otro estudio sobre asociaciones ilusorias. Se mostró a los sujetos un conjunto de tres objetos de color, con un número a cada lado del conjunto [*véase la figura 7*]. A continuación, unos 200 milisegundos después, aparecía un puntero acompañado de un rectángulo con un escaqueado estocástico, que habría de borrar cualquier persistencia visual de la representación inicial. Se pedía a los participantes que se fijaran en los dos números, los cantaran e identificaran a continuación el objeto al que señalaba el puntero. La secuencia era demasiado breve para que lograran centrar su atención en los tres objetos.

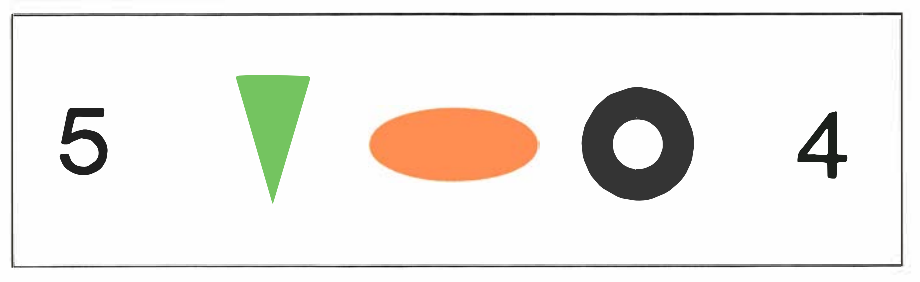
El aspecto decisivo del experimento residía en los nombres con que describíamos los objetos. Se le comunicó a un grupo de participantes que los objetos serían una "zanahoria naranja, un lago azul y un neumático negro". De vez en cuando (en uno de cada cuatro ensayos) se cambiaba el color de los objetos, para asegurarnos de que los participantes no se limitaban a nombrar el color que ya sabían de antemano debía hallarse asociado con una forma determinada. A otro grupo se le describió el mismo bloque de objetos como "un triángulo naranja, una elipse azul y un aro negro".

Los resultados fueron significativos. El grupo al que se mostraron pares arbitrarios de colores y formas percibió muchas combinaciones ilusorias: el 29 por ciento de sus respuestas correspondían a combinaciones ilusorias de colores y formas extraídas de los objetos presentes en el bloque, mientras que el 13 por ciento correspondían a colores y formas inexistentes allí. Por el contrario, los participantes que esperaban objetos familiares vieron menos combinaciones ilusorias: las combinaciones erróneas de colores y formas sólo eran un cinco por ciento más frecuentes que las combinaciones de colores y formas no presentes entre los objetos.

Ocasionalmente, a un tercer grupo de participantes se les mostraba combinaciones erróneas precisamente cuando esperaban que la mayoría de los objetos aparecieran en sus colores naturales. Nos sorprendió no hallar prueba alguna de que los participantes efectuaran asociaciones ilusorias ajustadas a sus propias expectativas. Por ejemplo, la probabilidad de que vieran el triángulo (la "zanahoria") naranja cuando era naranja otro objeto del grupo no era superior a la probabilidad de que lo vieran naranja cuando en el grupo no había ningún objeto de ese color. De ello cabe inferir dos cosas: el conocimiento previo y las expectactivas nos ayudan a utilizar con eficacia nuestra atención en la asociación de características y rasgos, si bien el conocimiento previo y las expectativas no parecen inducir a intercambios ilusorios de características para que los objetos anormales se perciban como normales. Por tanto, las asociaciones ilusorias parecen desarrollarse durante una fase del procesamiento visual anterior al ac-






**7. EFECTO DE LA EXPECTATIVA sobre la percepción de combinaciones de características. Se mostró a los sujetos del ensayo tres formas de color flanqueadas por un elemento de distracción, aquí un guarismo (*arriba*). A la presentación seguía un campo de enmascaramiento y un puntero (*centro*) que señalaba la ubicación previa de la forma sobre la cual debía informar el sujeto. Los participantes cometieron numerosos errores en su asociación de colores con formas cuando esperaban apareamientos arbitrarios de colores y formas (un triángulo naranja, una elipse azul y un aro negro). Como se suponía, cometieron menos errores cuando esperaban imágenes de objetos familiares (una zanahoria, un lago y un neumático). Algunas presentaciones (*abajo*) mostraban combinaciones inesperadas cuando a los sujetos se les había anunciado que verían combinaciones naturales. Y, sin embargo, los sujetos no se equivocaban más a menudo al anunciar que veían, por ejemplo, una zanahoria de color naranja cuando alguna de las figuras restantes era de ese color que si no aparecía el naranja en la escena. De estas últimas pruebas se deduce que las combinaciones ilusorias se forman en una fase del procesamiento visual no afectada por el conocimiento previo.**

ceso semántico al conocimiento de objetos familiares. Por lo que se ve, las asociaciones se extraen de los datos sensoriales, de abajo arriba, sin que sufran limitaciones descendentes.

¿Cómo se perciben los objetos cuando la atención se ha concentrado ya en ellos y se ha seleccionado, de entre las propiedades de la escena, el conjunto pertinente? En particular, ¿cómo se genera y mantiene la unidad perceptible de un objeto, aun cuando los objetos se muevan y cambien? Imaginemos que, bajo un ángulo e iluminación específicos, vemos un pájaro posado sobre la rama de un árbol. Su forma, tamaño y color cambian cuando se arregla el plumaje, extiende las alas y emprende el vuelo. A pesar de esas importantes variaciones en la casi totalidad de sus rasgos, el pájaro retiene su integridad perceptible: sigue siendo el mismo y único objeto.

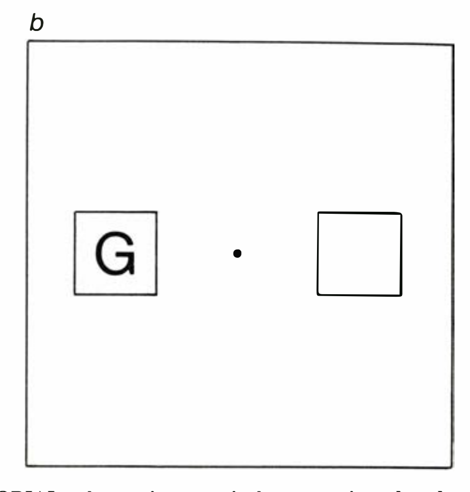
Daniel Kahneman, de la Universidad de California en Berkeley, y el autor han sugerido que en la percepción de un objeto no sólo interviene el reconocimiento, o el apareamiento con una etiqueta o descripción ya almacenada, sino también la construcción de una representación momentánea, específica de la apariencia habitual del objeto y que se actualiza constantemente en los cambios que éste experimenta. Hemos establecido una analogía con un archivo, o registro, en el que se va anotando toda la información perceptible (como si se tratara de una ficha policial, que comienza abriéndose un expediente sobre un acto delictivo, donde se recoge toda la información que sobre el delito vaya recopilándose). La continuidad perceptible de un objeto dependería entonces de que su manifestación actual se asigne o archive en el mismo registro que otras manifestaciones anteriores. Tal asignación es posible si el objeto permanece inmóvil o si cambia de sitio dentro de las limitaciones que permitan al sistema perceptor seguir la pista del registro al que pertenece.

Para someter a ensayo esa hipótesis diseñamos, en colaboración con Brian Gibbs, un ejercicio de identificación de letras [*véase la figura 8*]. Se proyectaban brevemente dos letras, encuadradas cada una por un marco. Se trasladaban luego los marcos, vacíos, a otro lugar. A continuación se mostraba otra letra en uno de los marcos. El diseño del ensayo aseguraba que las separaciones, en tiempo y espacio, entre la letra de estímulo y la última letra fueran siempre las mismas; sólo variaba el movimiento de los marcos. La tarea del sujeto consistía en nombrar la letra final lo antes posible.

a

G

N




**8. INTEGRACION DE LA INFORMACION SENSORIAL en lo que viene a equivaler a un registro de cada objeto perceptible. Se sometió a prueba en un experimento de movimiento de marcos. En cada ensayo se mostraban dos marcos; a continuación, sobre éstos se proyectaban brevemente dos letras (*a*). Se modificaba entonces la posición de la marca y en uno de ellos se mostraba otra letra (*b*). El sujeto debía identificar la última letra lo antes posible. Si coincidía con la primera y aparecía en el mismo marco, la identificación era más rápida que si la letra se mostraba en el otro marco o era distinta de la letra inicial. De lo que se deduce que exige más tiempo crear o actualizar el registro de un objeto que percibirlo una segunda vez.**

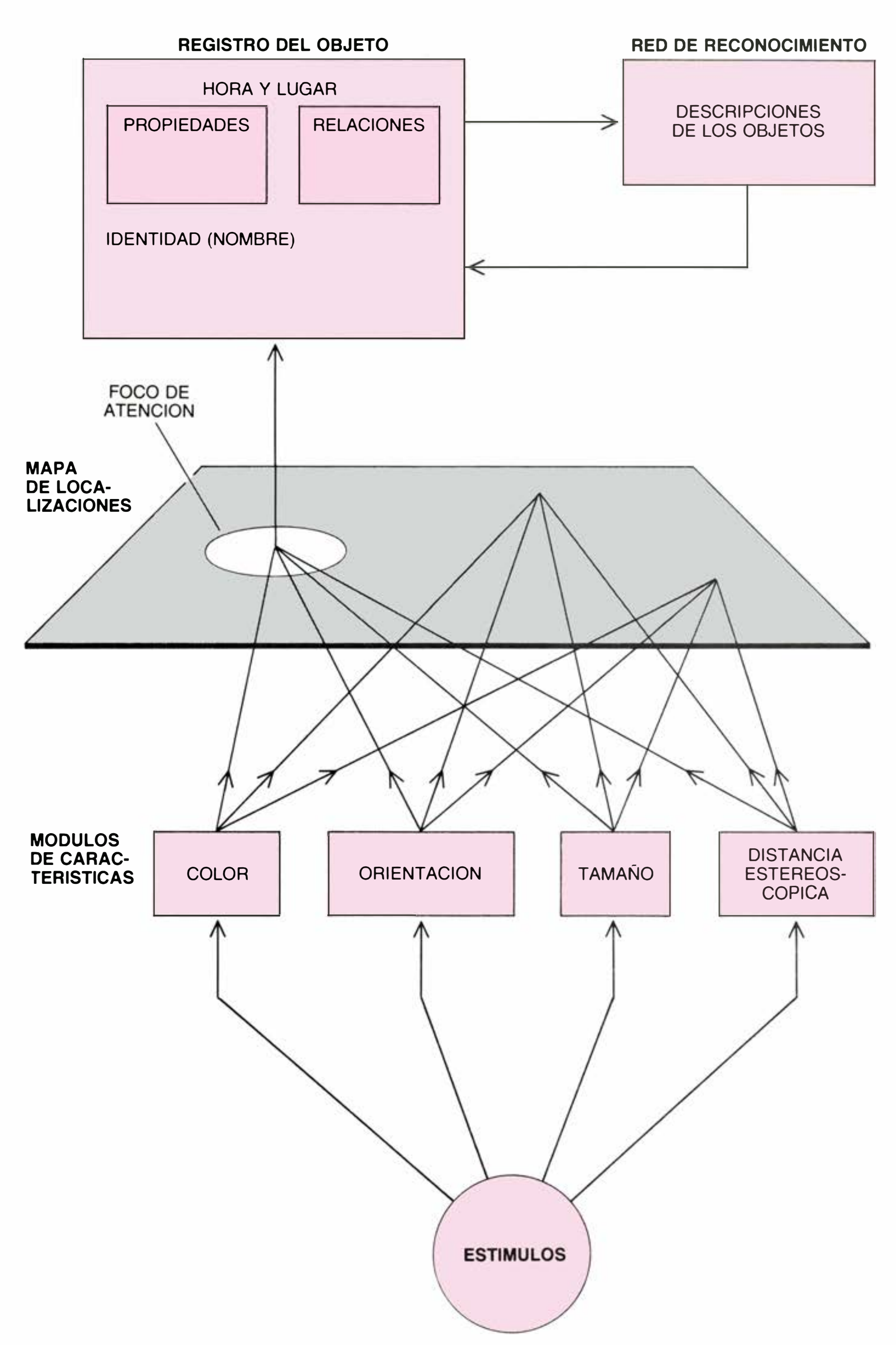
Sabíamos que la exposición a una letra suele reducir el tiempo requerido para identificar la misma letra cuando aparece por segunda vez, efecto que se conoce como de apestamiento o facilitación (*priming*). Queríamos averiguar si el efecto de apestamiento se produciría sólo en ciertas circunstancias. Pensábamos que, si la última letra era la misma que la de estímulo y aparecía en el mismo marco, se interpretaría que ambas constituían un mismo objeto; en ese caso podría considerarse que la tarea de percepción consistía simplemente en repetir la observación del objeto original en su nueva posición. Pero si en el mismo marco aparecía una nueva letra, debería actualizarse el registro del objeto, lo que quizás aumentase el tiempo requerido para percibir e identificar la letra.

Se comprobó que el apestamiento era específico del objeto; los participantes identificaban la última letra unos 30 milisegundos antes cuando aparecía previamente en el mismo marco. No ocurría otro tanto cuando había aparecido la misma letra en el otro marco. Este resultado está en armonía con la hipótesis según la cual, en representaciones transitorias específicas del objeto, las fases posteriores de la percepción visual incorporan información de las fases iniciales, sensibles a características.

El esquema general del procesamiento visual que propongo puede plasmarse en un modelo [*véase la figura 9*]. El sistema visual comienza codificando cierto número de propiedades elementales y útiles en lo que puede considerarse una pila de mapas. En el cerebro, tales mapas suelen conservar as relaciones espaciales del mundo visual; empero, la relación espacial que contienen pudiera no hallarse directamente disponible en las fases posteriores del procesamiento visual. En su lugar, la presencia de cada característica podría señalarse sin especificar *dónde* se encuentra.

La concentración de la atención actúa en las fases posteriores. En particular, se considera que la concentración de la atención actúa mediante un mapa principal de ubicaciones, que registra la presencia de discontinuidades de la intensidad o del color sin especificar el punto donde se producen tales discontinuidades. La atención hace uso de este mapa principal seleccionando simultáneamente, por medio de enlaces con los diferentes mapas de características, cuantas se hallan en un punto previamente seleccionado. Estas se registran en un medio de representación temporal, o archivo, del objeto.

Finalmente, el modelo postula que la información integrada acerca de las propiedades y relaciones estructurales de cada registro del objeto se compara con descripciones almacenadas en una "red de reconocimiento". La red especifica los atributos fundamentales de los gatos, árboles, jamón, huevos, la abuela y todo objeto perceptible familiar, permitiendo el acceso




**9. MODELO HIPOTETICO de las fases iniciales de la percepción visual deducido de los experimentos realizados por el autor y su equipo. Postula que la visión inicial codifica ciertas propiedades útiles y simples de una escena en varios mapas, que probablemente conserven las relaciones espaciales del mundo visual, aunque no faciliten información espacial a las fases posteriores del procesamiento. Antes bien, la atención concentrada (empleando un mapa maestro de ubicaciones) selecciona e integra las características de cada punto. En fases posteriores la información integrada se emplea para crear y actualizar registros de objetos perceptibles. El contenido de los registros se compara con descripciones almacenadas en una red de conocimiento, que contiene los atributos, comportamiento, nombres y significado de objetos familiares.**

a su nombre, su probable comportamiento y su significación actual. Doy por supuesto que la percepción consciente depende de los archivos del objeto y de la información que contienen. Depende, en otras palabras, de representaciones que recogen información sobre objetos particulares, tanto del análisis de características sensoriales como de la red del reconocimiento, y que la actualizan continuamente. Si se produce una discontinuidad significativa en el tiempo o el espacio, el registro original de un objeto puede anularse: deja de ser una fuente de experiencia perceptiva. En cuanto al objeto, desaparece y lo sustituye otro, con su propio y nuevo registro temporal, listo para comenzar una nueva historia perceptiva.

# Galileo y el fantasma de Bruno

*Venerados a menudo como "mártires" de la ciencia, lo cierto es que la astronomía era, en Bruno, un medio para la política y la teología. Galileo fue procesado en parte porque sus objetivos se confundieron con los de aquél*

Lawrence S. Lerner y Edward A. Gosselin

En 1633 Galileo Galilei fue llevado ante la Inquisición y acusado de enseñar que la Tierra se movía. El proceso que vino a continuación comprometió la autoridad de la Iglesia Católica en una disputa científica y teológica con el científico más importante del momento. Como es bien sabido, Galileo fue obligado a retractarse públicamente de sus convicciones por haber defendido la imagen copernicana del universo, posición que había sido condenada en 1616 como "falsa y contraria a la Sagrada Escritura". El incidente está considerado en la actualidad por todo el mundo como un acontecimiento decisivo en el nacimiento de la ciencia moderna.

En 1600, fresco todavía en la memoria en el momento del proceso de Galileo, Giordano Bruno había encontrado la muerte a manos de la Inquisición. Bruno era también un copernicano famoso, pero la pena que se le impuso fue mucho más severa: fue quemado en la hoguera. Las trayectorias y las persecuciones de Galileo y Bruno han quedado unidas en dos clases de mito que tienden a confundir las figuras de ambos por procedimientos curiosamente opuestos. Según el primer mito, los dos habrían desafiado a una Iglesia Católica ignorante y oscurantista apelando al espíritu moderno de libertad y ambos habrían sufrido el martirio por su causa. En este contexto Bruno, aparecía como una especie de proto-Galileo o quizá como un Galileo fallido. Era un proto-Galileo porque él también habría abrazado el sistema copernicano y había sufrido una versión extrema de la suerte de Galileo. Era un Galileo fallido porque, al carecer de la capacidad y el genio científico de Galileo, había recurrido a un misticismo especulativo. Este mito, al igual que ocurre con otros muchos, contiene un núcleo de verdad, pero la documentación histórica nos proporciona una narración mucho más rica y elaborada.

El segundo mito es casi el reverso del primero: Galileo era una especie de Bruno resucitado ya que, al igual que éste, fue considerado un revolucionario religioso y político. Este segundo mito no debe ser desechado como un simple error. Es más: nuestras investigaciones nos han convencido de que el conocimiento de su papel en las creencias de comienzos del siglo XVII es esencial para una mejor comprensión de lo que podríamos denominar el clima anterior al proceso de Galileo. Sostendremos a continuación que los problemas de Galileo se produjeron, en parte, porque sus contemporáneos tergiversaron su nueva forma de pensar confundiéndola con las categorías, más tradicionales y mejor entendidas, que había articulado Giordano Bruno.

El primer mito, que nos pinta a Bruno como uno Galileo fallido, fue popular en el siglo XIX y buena parte del nuestro; su moraleja estaba en consonancia con la imagen del mundo liberal del XIX. El mito apoya la seductora leyenda según la cual cuando Galileo abjuraba de su posición copernicana se le oyó decir entre dientes: "Eppur si muove" ("Y sin embargo se mueve"). No hay prueba alguna que confirme tal hecho y el Galileo auténtico no encaja en un papel tan heroico. Se le representa burdamente como un Nathan Hale o un Guillermo Tell.

¿Y qué pasa con Bruno? ¿Cómo enmarcarlo en el primer mito que lo convierte en un mártir de la ciencia? Para mayor sencillez limitaremos nuestra exposición fundamentalmente a su primera y más importante obra sobre el sistema copernicano: *La Cena de le ceneri* (*La cena de las cenizas*, o más brevemente *Cena*). Fue escrita en italiano en 1584. Por aquel entonces, Bruno era miembro del séquito londinense del embajador francés en Inglaterra.

Si atendemos a la obra como una exposición del sistema copernicano junto con otros tópicos científicos, no podremos dejar de sorprendernos ante su fama. La obra es aparentemente un compendio de sinsentidos, un despliegue desorganizado de un rudo error conectado mediante pasajes incomprensibles. Bruno ha deformado el modelo copernicano del sistema solar. Demuestra una total ignorancia de las ideas más elementales de geometría, por no hablar ya de la óptica geométrica. Introduce migajas de un argumento pseudocientífico, en su mayor parte distorsionadas, y se lanza a especulaciones de altos vuelos que no parecen guardar conexión con los argumentos anteriores o subsiguientes. Incluso los mismos diagramas no se corresponden siempre con las discusiones del texto a que hacen referencia.

Pero debe haber más, y este significado más profundo tuvo que ser evidente para los contemporáneos de Bruno. Si Bruno hubiera sido sólo un loco, habría suscitado carcajadas y burlas, pero no una hostilidad violenta y una respuesta oficial vehemente. La Inquisición no se hubiera tomado, con

**1. RETRATO DE GALILEO, obra del artista del siglo XVII Ottavio Leoni. Representa a Galileo a la edad de unos 60 años. En aquellos momentos, Galileo y sus seguidores abrigaban grandes esperanzas intelectuales: aproximadamente un año antes, en 1623, un joven florentino, el cardenal Maffeo Barberini, erudito y amante de las artes, había sido elegido papa con el nombre de Urbano VIII. Un tapiz del Vaticano representa a Barberini defendiendo una tesis doctoral en torno a la comúnmente aceptada astronomía ptolemaica; sin embargo, había seguido con despierto interés las investigaciones de Galileo en torno al modelo copernicano del sistema solar. Los dos hombres sostuvieron una serie de largas conversaciones en mayo y junio de 1624. Nueve años después, su amistad se trocó en hostilidad y Urbano obligó a Galileo a abjurar de sus convicciones. El proceso de Galileo fue para el papa un expediente político, en parte debido al hecho de que, ante la conciencia pública, Galileo recordaba a Giordano Bruno, un revolucionario en teología y en política, además de un temprano defensor de las ideas copernicanas, que acabó ajusticiado en la hoguera en el año 1600.**



toda seguridad, las molestias que se tomó para hacerle callar y castigarle: estuvo en prisión durante ocho años y fue sometido a innumerables auditorios e interrogatorios antes de ser finalmente ejecutado.

Bruno deja repetidas veces claro que la *Cena* no trata del sistema copernicano: sólo de forma muy accidental se ocupa de la ciencia natural y hay que decir rotundamente que no debe ser leída de forma literal. De acuerdo con su mismo título, el motivo central de la misma es la naturaleza de la Eucaristía. Bruno alaba altamente a Copérnico como la luz que precede a un nuevo amanecer. Acumula burlas, sin embargo, sobre el anónimo autor del prefacio al *De revolutionibus orbium coelestium* copernicano, pues Bruno se da claramente cuenta de que el prefacio es espúreo: como medida cautelar dicho prefacio sugiere que la astronomía copernicana debería ser entendida únicamente como una teoría para el cálculo y no como una descripción de la realidad física. (En la actualidad los estudiosos saben que fue escrito por Andreas Osiander, teólogo luterano que había sido alumno de Copérnico.)




**2. GIORDANO BRUNO aparece retratado en este grabado anónimo de comienzos del siglo XVII, más de dos décadas después de su ejecución. Es su retrato más antiguo llegado hasta nosotros, pero no se conoce ninguna fuente contemporánea a Bruno; la semejanza es probablemente nula. Bruno aparece con el hábito de la orden dominicana a la que pertenecía, vinculación que reconoció en grados diversos en diferentes momentos de su vida. El nombre que tomó al entrar en religión aparece en la inscripción en la forma latina (su nombre de pila era Filippo). "Nolanus" alude a su lugar de nacimiento, Nola, un suburbio de Nápoles.**

Para Bruno, el valor del sistema copernicano no reside en sus detalles astronómicos, sino en su dimensión de vehículo poético y metafórico para una especulación filosófica mucho más amplia. La sustitución copernicana de la Tierra por el Sol en el centro del sistema solar representa, para él, la restauración simbólica de lo que llama la antigua filosofía verdadera; en su opinión, hay que volver a esta filosofía para entender el verdadero significado de la Eucaristía.

La "antigua filosofía verdadera" era la elaboración bruniana del Hermetismo, una visión mística basada en escritos neoplatónicos de los siglos II y III d. C. En la época de Bruno creíase que el autor de esos escritos era el semidivino Hermes Trismegisto, al que se tenía por contemporáneo de Moisés. Se suponía que la filosofía hermética había sido transmitida a través de Orfeo, Zoroastro, Pitágoras, Platón y los filósofos griegos tardíos, así como independientemente a través de la tradición judeocristiana. A lo largo de este proceso, la "antigua filosofía verdadera" había quedado adulterada y corrompida, lo cual explicaba en opinión de Bruno el lamentable estado de las cosas del mundo.

Según la visión hermética de Bruno, el hombre participa de la divinidad y está, por tanto, al menos potencialmente, en constante comunión con Dios. El principio divino universal se extiende a las entidades que conforman el universo macrocósmico y al hombre. De esta manera, estrellas y planetas (Bruno no distingue entre ellos) están animados y dotados de almas. Es posible actuar mágicamente sobre ellos para producir un cambio político y social. Redescubierta y repulida por Bruno, la "antigua filosofía verdadera" eliminaría las trabas que se oponían a la presencia de la esencia divina en todos los hombres. Su poder curaría heridas religiosas y políticas y daría nacimiento a una nueva edad de oro.

Conviene tener presente que la adopción bruniana de la ciencia natural

para promover amplios propósitos teológicos, éticos, sociales y políticos era un rasgo característico de la imagen renacentista del universo. Para los hombres del Renacimiento, la ciencia constituía una rama de la filosofía a la que se recurría frecuentemente para arrojar luz o ilustrar un punto no científico. Gente inteligente e ilustrada veía con frecuencia explícitos y elevados paralelos antropocéntricos entre el conocimiento científico y otros aspectos de la vida. Bruno actúa como un típico hermetista del Renacimiento al saltar a conclusiones sobre la relación de los hombres con Dios a partir de teorías sobre los efectos del macrocosmos, y viceversa.

Tal como Bruno lo veía, una consecuencia inevitable del retorno a la "verdadera filosofía" sería el reconocimiento de la esencial unidad existente entre los protestantes liberales de Inglaterra y los católicos liberales de Francia. El tema de la unidad resuena a todo lo largo de la *Cena*; por ejemplo: en el sistema ptolemaico se hace una distinción fundamental entre la Tierra –considerada inmóvil– y los planetas y estrellas, que se suponía giraban en esferas concéntricas en torno a nuestro planeta. Por el contrario, cuando se ha aceptado la imagen copernicana la Tierra móvil y las estrellas móviles gozan de un *status* similar. Además, Bruno pobló un universo infinito con un número infinito de estrellas, todas ellas en movimiento y al mismo tiempo centro de los astros que las circundaban, de forma equivalente al sistema solar. De la misma manera, Bruno proponía un marco en el que las visiones protestante y católica de la Eucaristía podían considerarse esencialmente equivalentes.

¿Cuáles eran las implicaciones de este enfoque con respecto a la política contemporánea? Para mantener el equilibrio de poder, Inglaterra se había aliado tradicionalmente con Francia o con España, con aquel que era más débil. A finales del siglo XVI, España era poderosa y ortodoxa en lo religioso. Francia se debatía en la agonía de una violenta y prolongada guerra civil en la que España apoyaba al partido ortodoxo de los Guisa contra los protestantes. El moderado rey de Francia Enrique III y sus partidarios habían quedado atrapados en medio. No obstante, una alianza entre los moderados franceses e Inglaterra, que parecía deseable para ambas partes, estaba bloqueada por la adhesión oficial de Francia al Catolicismo. Un puente por encima de las diferencias religiosas habría sido por tanto de gran valor a la hora de promover la alianza en cuestión.

Bruno estaba convencido de que un monarca inspirado e ilustrado por el Hermetismo podía llevar al mundo a una edad de oro bajo la guía de la "verdadera filosofía". Sus candidatos para este papel fueron sucesivamente Enrique III, Isabel I de Inglaterra y, finalmente, Enrique IV de Francia. De hecho, dos años después de la publicación de la *Cena* confió a Guillaume Cotin, bibliotecario de la abadía parisiense de San Víctor, que de 1582 a 1585 había sido una especie de embajador intelectual de los católicos liberales de Enrique III ante la corte protestante liberal de Isabel I. El entusiasmo posterior de Bruno por las perspectivas de Enrique IV fue tan grande que, en 1591, interrumpió imprudentemente sus peregrinaciones a lo largo de Europa para volver a Italia. El objetivo último que perseguía con este regreso parece que era la conversión del mismo papa al hermetismo bruniano.

Esta temeraria conducta condujo, de forma casi inmediata, al desastre. Fue detenido por cargos forjados por la Inquisición veneciana y encarcelado en aquella misma ciudad. Al año siguiente se le trasladó a Roma, donde estuvo confinado durante otros siete años. En la cárcel Bruno no representaba amenaza alguna para el papado. No tenía seguidores, carecía de dinero y de influencia. Según el curso normal de los acontecimientos podría haber permanecido en prisión sencillamente hasta el final de su vida o hasta que hubiera quedado olvidado. Su ejecución parece haber sido la parte papal de un *quid pro quo* político menor con los Habsburgo españoles.

Al condenar a Bruno, el papado y España anunciaban a todos los interesados que no se toleraría ningún desafío ni a la ortodoxia religiosa ni al *status quo* político con el que la ortodoxia estaba estrechamente vinculada, una conexión que exploraremos más detenidamente. Sin embargo, la herencia filosófica de Bruno estaba viva a comienzos del siglo XVII en una laxa constelación de creencias sostenida por un grupo desorganizado de intelectuales llamados "rosacrucianos". Los objetivos y esperanzas de los rosacrucianos de un retorno del pitagorismo se vieron alimentados en 1613 con el matrimonio de Federico IV, elector del Palatinado Renano, con Isabel Estuardo, hija del rey Jacobo I de Inglaterra. El matrimonio, denominado místicamente "las bodas químicas del Támesis y el Rin", era considerado un presagio del retorno de la edad dorada de Isabel I.

En 1618 Federico e Isabel fueron elegidos rey y reina de Bohemia, región que venía siendo de forma intermitente un centro de liberalismo y tolerancia religiosa. De forma casi inmediata fueron depuestos por el Sacro Emperador Romano de la casa de Habsburgo. El incidente fue la señal que marcó el comienzo de la guerra de los Treinta Años, que renovó las disputas políticas y religiosas de finales del siglo XVI. En los años inmediatamente siguientes hubo una especie de "miedo rosacruciano": un poderoso e irracional temor a la subversión rosacruciana en las fortalezas católicas.

Este era el clima político y religioso dominante cuando en 1632 se publicó el *Diálogo sobre los dos máximos sistemas del mundo*, la exposición popular de Galileo de sus opiniones copernicanas. La publicación tuvo un profundo significado para una gente cuyos recuerdos de los conflictos reli-

LA
CENA DE
*le Ceneri.*
DESCRITTA IN
CINQVE DIALOGI, PER
quattro interlocutori, Con tre considerationi, Circa doi
suggetti.
All'unico refugio de le Muse. l'Illustriss. Michel di Castelnouo, Sig. di Mauuissier, Concressalto, et di Ionuilla, Caualier del ordine del Re Christianiss. et Conseglier nel suo priuato conseglo. Capitano di 50. huomini d'arme, Gouernator et Capitano di S. Desiderio. et Ambasciator alla sereniss. Regina d'Inghilterra.
L'vniuersale intentione è dechiarata nel proemio.
1584.

**3. LA VERSIÓN BRUNIANA** de la imagen copernicana del universo aparece en *La Cena de le ceneri* ("La cena del miércoles de ceniza"), cuya portada aparece aquí. La obra fue escrita en italiano y publicada en Inglaterra en 1584; en 1977 apareció una traducción inglesa a cargo de los autores del presente artículo. [Hay traducción castellana: *La cena de las cenizas*; Madrid, 1984.] El libro tiene la forma de un debate en torno al sistema copernicano; el verdadero objetivo de Bruno era extender alegóricamente las ideas copernicanas a la especulación teológica y política. El subtítulo de la obra conduce inexorablemente al tema de la unidad enfatizado a lo largo de toda ella: "descrita en cinco diálogos, por cuatro interlocutores, con tres consideraciones, acerca de dos materias [dedicado] al único refugio de las musas".

giosos de las postrimerías del siglo XVI eran aún frescos y minuciosos. En una atmósfera política y religiosa semejante a la de la década de 1590, resultaba demasiado fácil confundir los objetivos de Galileo con los de Bruno. Este es el origen del segundo mito, inverso del primero: para la opinión pública de 1633, Galileo resultó ser una renovación, cierto que involuntaria, del símbolo arquetípico de la conmoción política y filosófica que Bruno había provocado tres décadas antes.

Ahora sabemos que la manera de pensar galileana era una ruptura radical con respecto al pensamiento renacentista. Incluso se ha mantenido con frecuencia que la mayor contribución de Galileo fue su manera de pensar acerca del universo físico. Por desgracia, tal cosa no era necesariamente clara para la gran mayoría de sus contemporáneos, incapaces de entender no sólo sus métodos y sus conclusiones, sino también sus objetivos y sus intenciones.

Unido a esta falta de comprensión estaba el hecho de que el lector del Renacimiento tardío se hallaba predispuesto a esperar un modo de escribir deliberadamente oscuro. Tal oscuridad era general, aun cuando no había un motivo externo para ella. Su popularidad se explica, en parte, por un apego a la ornamentación y a una elaborada elegancia expresiva. Había también un fuerte sentimiento de que el conocimiento era para el iniciado y que una plena comprensión sólo podía alcanzarse tras mucho esfuerzo. La manera de escribir de la época de Galileo está llena a menudo de múltiples significados que permiten al lector diligente pasar de una profundidad a otra. Se pensaba que tal conceptismo literario era un reflejo apropiado del mundo natural, que proporciona secretos cada vez más profundos al lector inteligente y dotado. No hay que decir que Bruno empleaba este procedimiento con enorme frecuencia.

Galileo no escribía así en absoluto, pero resulta mucho más fácil apreciar este hecho hoy que a comienzos del siglo XVII. En aquel tiempo, había alguna gente inclinada a creer que su forma expositiva ocultaba también múltiples niveles de significado; concretamente, su *Diálogo* podía ser leído perfectamente como una secuela de la *Cena* de Bruno.



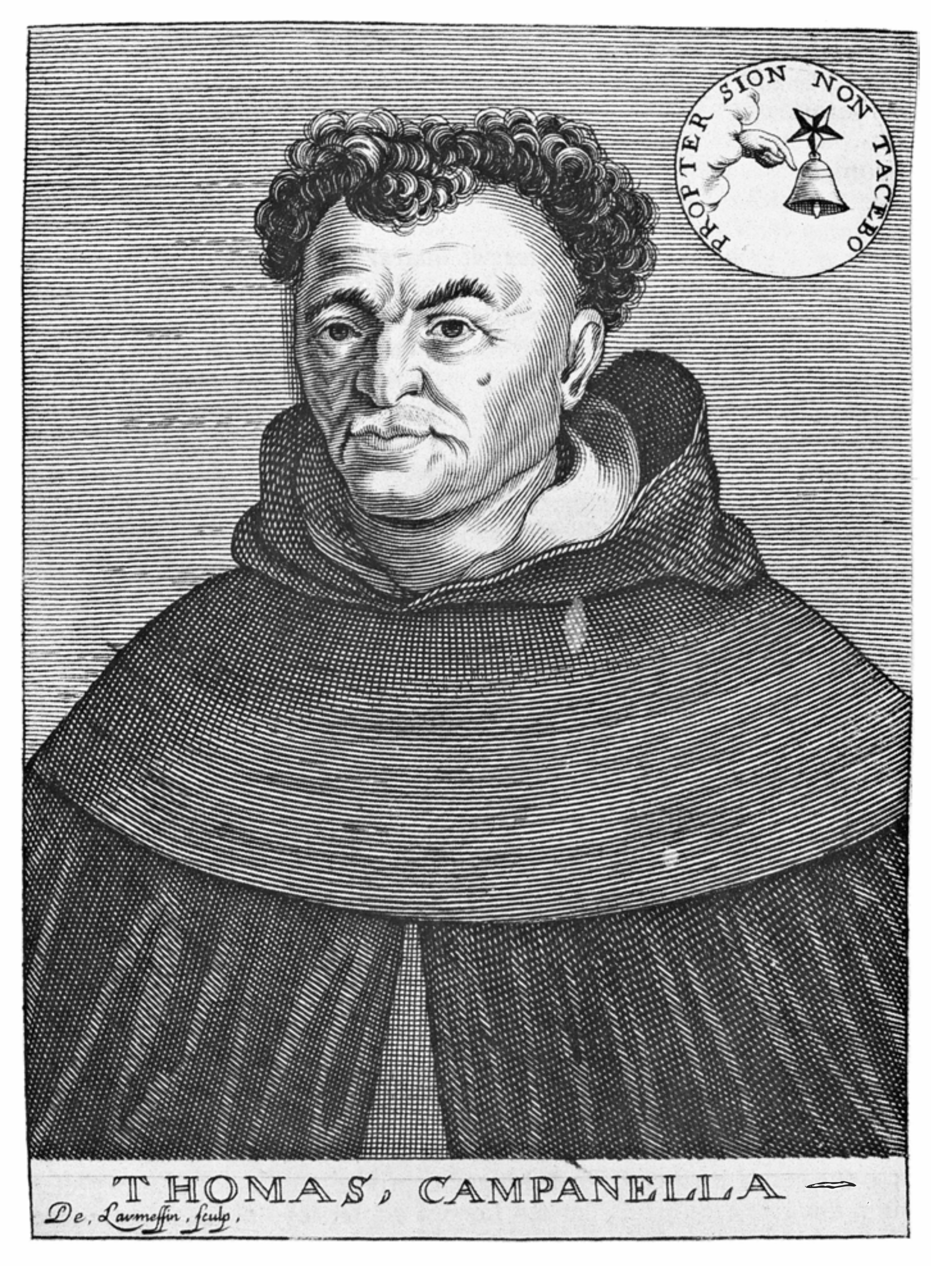

**4. EL CARDENAL ROBERTO BELARMINO desempeñó un importante papel a la hora de decidir la suerte de Bruno en 1600 y él personalmente advirtió a Galileo en 1616 que no sostuviera o defendiera la doctrina copernicana del movimiento de la Tierra. La entrevista, sin embargo, mostró claramente a Galileo que Belarmino no excluía el estudio de la opinión copernicana como una hipótesis científica. La muerte de Belarmino antes del proceso galileano de 1633 dejó ambigua la posición de la Iglesia tal como había sido afirmada previamente a Galileo. Este retrato de Belarmino se encuentra en Roma, en la iglesia de San Ignacio.**

¿En qué razones se basaba esta apreciación? En primer lugar, cabría aducir lo que podríamos llamar razones literarias externas. Con anterioridad, Galileo había escrito una obra titulada *El mensajero sideral* y en la *Cena* Bruno llamaba a las estrellas "mensajeros de Dios". Además, tanto la *Cena* de Bruno como la *Carta a la Gran Duquesa* de Galileo habían expresado actitudes similares con respecto a la Sagrada Escritura. Ambas obras afirmaban que la Biblia habla a menudo según la manera común de entender del vulgo y al hacerlo puede decir de hecho cosas acerca de la naturaleza que no son literalmente verdaderas. Opinión suficientemente rara para que Galileo y Bruno se asociaran estrechamente. Por último, vale la pena mencionar que uno y otro denominaban a la teoría copernicana "pitagórica", nombre que solía emplearse como sinónimo del término, políticamente desagradable, Hermetismo.

En segundo lugar, ambas obras –la *Cena* de Bruno y el *Diálogo* de Galileo– guardan un notable parecido en la forma. Ambos diálogos, por ejemplo, introducen como interlocutores a caballeros cortesanos y a aristotélicos dogmáticos. En ellos se presenta una extensa discusión de un experimento mental en mecánica: si se arroja una piedra desde lo alto del mástil de un barco en movimiento, ¿en qué lugar de la cubierta caerá la piedra? Ambas obras dan, también, la misma respuesta correcta: la piedra caerá al pie del mástil. No importa que los puntos señalados por el experimento mental sean enteramente diferentes en las dos obras o que los argumentos de Bruno sean dis-

torsionados cuando se les toma en un sentido puramente físico. Un lector suspicaz no inclinado a la física encontraría fácil confundir las intenciones de Galileo con las de Bruno. Además, los dos diálogos están escritos en italiano y no en latín. Hoy sabemos que las razones de este alejamiento lingüístico de las convenciones intelectuales contemporáneas son bastante diferentes, pero un lector suspicaz podía pensar de nuevo que, en ambos casos, se adoptaba la lengua vulgar para suscitar el debate y la rebelión intelectual en la mayor escala posible.

Hay otra semejanza formal, más global aún, entre las dos obras; se trata de una semejanza que podía conducir fácilmente a una errónea conclusión acerca de las intenciones de Galileo. En ambas obras se defiende el sistema copernicano de una manera no matemática y no técnica, ignorando totalmente los verdaderos detalles que hacen dicho sistema interesante y asumible como instrumento de trabajo por parte del astrónomo práctico. Ya hemos indicado que Bruno utiliza la visión copernicana como un jeroglífico de sus objetivos religiosos y unionistas. El diálogo de Galileo es una obra exclusivamente filosófica y científica, pero tampoco defiende de hecho el sistema copernicano en su forma por aquel entonces corriente. En lugar de ello, Galileo amplía su discusión para dictaminar entre su propia filosofía de la naturaleza y la de Aristóteles. El *Diálogo* queda de esta manera abierto a la sospecha de que su verdadero objetivo está por debajo de la superficie, como es ostensiblemente el caso de la *Cena*.




**5. TOMMASO CAMPANELLA, retratado aquí en un grabado del siglo XVII obra de Nicolás de Larmessin el viejo, fue un fraile dominico apóstata, encarcelado en 1599 por encabezar una rebelión contra el dominio de los Habsburgo en el sur de Italia. Torturado, sometido al hambre y al frío durante su estancia en la prisión, escribió no obstante toda una serie de volúmenes sobre ideas herméticas y sobre el copernicanismo filosófico. En 1616 publicó su *Apologia pro Galileo* ("Apología de Galileo"), en la que sostenía que las opiniones astronómicas de Galileo estaban de acuerdo con la teología católico-romana ortodoxa. Campanella gozó más tarde de la confianza del papa durante un tiempo, pero cayó una vez más en desgracia. Es una figura muy importante en la confluencia de acontecimientos que llevaron finalmente a Galileo ante el tribunal de la Inquisición. El lema *Propter Sion non tacebo* evoca el celo de Campanella: "Por causa de la Ciudad Celeste no callaré".**

La estrecha vinculación entre política y religión que mencionábamos antes subyace a una tercera razón importante para confundir a Galileo con Bruno. El copernicanismo estaba ampliamente asociado con el pensamiento revolucionario en religión y en política. En 1599 Tommaso Campanella, un dominico apóstata, dirigió una revuelta contra la dominación de los Habsburgo en Calabria, una región del sur de Italia. Campanella pretendía restaurar la famosa ciudad antigua pitagórica de Crotona, en Calabria, pero su revuelta fue aplastada rápidamente y él pasó los 26 años siguientes en prisión. A lo largo de todos aquellos años se mantuvo alejado de la ociosidad. En 1600 escribió su *Ciudad del sol*, una obra hermética y copernicana (aunque no era copernicana en el sentido astronómico del término). A los pocos años de su detención, sus guardianes perdieron el interés por él, lo cual le dejó en una relativa tranquilidad para escribir, cosa que hizo voluminosamente.

En 1616 Campanella recibió la noticia de que el cardenal jesuita Roberto Belarmino planeaba amonestar a Galileo a causa de las peligrosas implicaciones teológicas de sus enseñanzas científicas. Campanella escribió a toda prisa una *Apologia pro Galileo* en la que intentaba mostrar que las opiniones de éste se hallaban, de hecho, más de acuerdo con la teología imperante que el sistema ptolemaico. Los argumentos teológicos presentados por Campanella sobre este particular ofrecen grandes semejanzas con los avanzados tanto por Bruno como por Galileo. Es posible que posteriormente redundara en perjuicio de Galileo el hecho de que la *Apologia* fuera la única obra de Campanella en que se menciona a Bruno.

Campanella escribió también varias cartas a Galileo desde la prisión. Muestran con claridad que él veía a Galileo en gran medida tal como Bruno había visto a Copérnico: un genio que anunciaba la aurora de la nueva verdad sin comprender el significado filosófico de

sus descubrimientos. Tal actitud era casi con certeza compartida por otros muchos menos favorables a Galileo que Campanella.

Abrigamos la fuerte sospecha de que la estrecha, aunque no deseada, asociación con Campanella fue un elemento muy importante en la retractación de Galileo. Cuando aquél salió al fin de la prisión obtuvo el favor del papa. A finales de la década de 1620 España se fue volviendo cada vez más hostil a Urbano VIII por seguir una política profrancesa parcialmente secreta y más bien chapucera. En consecuencia, España se embarcó en una guerra psicológica que aprovechó la fe de Urbano VIII en la astrología: hubo astrólogos que predijeron la muerte del pontífice con ocasión del eclipse solar de junio de 1628 y posteriormente con motivo del eclipse de diciembre de 1630. Campanella tenía fama de mago o brujo y por ello Urbano se sirvió de su ayuda para realizar magia en contra del eclipse. Dicha magia resultó un éxito, pues Urbano no murió.



DIALOGO
DI
GALILEO GALILEI LINCEO
MATEMATICO SOPRAORDINARIO
DELLO STVDIO DI PISA.
*E Filoſofo, e Matematico primario del*
SERENISSIMO
GR. DVCA DI TOSCANA.
Doue ne i congreſſi di quattro giornate ſi diſcorre
ſopra i due
MASSIMI SISTEMI DEL MONDO
TOLEMAICO, E COPERNICANO;
*Proponendo indeterminatamente le ragioni Filoſofiche, e Naturali tanto per l'vna, quanto per l'altra parte.*



CON PRI VILEGI.

IN FIORENZA, Per Gio:Batiſta Landini MDCXXXII.

*CON LICENZA DE' SVPERIORI.*

**6. PORTADA del *Diálogo de los dos máximos sistemas del mundo* de Galileo. Está decorada con un colofón del impresor, que representa tres peces nadando uno detrás de otro en círculo. El simbolismo no intencionado del emblema causó furor en medios eclesiásticos. Se creyó que los peces eran delfines –sin justificación alguna para el ojo moderno–, y los delfines fueron tomados inmediatamente como una representación de ideas herméticas y brunianas que habían sido condenadas por la Iglesia. En el contexto contemporáneo de la guerra de los Treinta Años el emblema fue interpretado también como un símbolo de apoyo filosófico y teológico al bando francés. La leyenda *Grandior ut proles* ("Mayor que la descendencia") fue interpretada erróneamente como significando que Galileo estaba extendiendo la obra de Bruno remitiéndose a un predecesor superior, quizás Apolo, Pitágoras o Hermes Trismegisto, las figuras más representativas de la filosofía hermética.**

Durante unos años, el éxito de Campanella le permitió acceder a la confianza del papa. Era necesario, sin embargo, mantener tales operaciones mágicas en estricto secreto. En 1600 el jesuita Martín del Río había expresado una opinión de la Iglesia según la cual quedaban condenadas muchas formas de magia. No era cuestión de dejar que la gente viera al pontífice comprometido en una actividad que se podía calificar de herética.

Campanella capitalizó el éxito de su magia antieclipse para promover sus opiniones herméticas, y hasta cierto punto tuvo éxito. De hecho Urbano VIII dio en un punto autorización a Campanella para fundar un colegio de misioneros (denominado Barberini, por el apellido del papa) que convertiría el mundo a un catolicismo "reformado", "natural" (tales adjetivos eran divisas herméticas). A Urbano le agradó el hermetismo de Campanella y se sintió estimulado en su propia política profrancesa. Ingresó en una alianza con Francia. Entretanto, sin embargo, los franceses habían dado su apoyo al rey protestante sueco Gustavo Adolfo. En 1632 las victorias militares del rey habían sido tan sensacionales que la fortuna política del Sacro Imperio Romano y la fortuna religiosa de la Iglesia estaban seriamente amenazadas en gran parte de Alemania.

De esta manera, la política profrancesa resultó ser demasiado afortunada y ya no se podía seguir ignorando la creciente hostilidad de los Habsburgo. En un clima político de tales características, no es sorprendente que Urbano comenzara a mirar a Campanella como un falso profeta y a considerar peligrosas todas sus enseñanzas. Dado que Campanella, Bruno, el hermetismo y el copernicanismo se confundían todos entre sí, no había más que un paso en la mente de Urbano para conectarlos con otro eminente copernicano: Galileo. Ante el particular trasfondo de miedo y sospecha, esta asociación y otras podrían haber inclinado al papa y a las autoridades romanas a considerar erróneamente a Galileo como un antipapista, un liberal religioso y quizás un hermetista.

Había una cuarta razón para la confusión renacentista de Galileo con Bruno, una razón que parece peculiar de la mentalidad moderna. En la portada del *Diálogo* galileano su editor, Giovanni Batista Landini, había añadido un colofón o emblema que representaba tres delfines nadando uno detrás de otro en un círculo [*véase la figura 6*]. El emblema podía estar cons-

truido –y de hecho lo estaba– con un sentido extremadamente perjudicial. En una carta dirigida a un amigo de Galileo en Florencia, Filippo Magalotti –discípulo romano de Galileo– describía el contenido de una entrevista con el padre Niccolò Riccardi. Riccardi era un florentino que había subido muy alto en la burocracia papal, hasta el punto de alcanzar el cargo de Maestro del Sacro Palacio, es decir, teólogo del papa. Magalotti escribe en un determinado momento:

"El lunes por la mañana... el muy reverendo padre... vino a buscarme... Entonces pasó a exponer otra razón para desear tener el *Diálogo*... Bajo secreto me dijo que se había sentido un gran agravio con el emblema del frontispicio... Al oírlo estallé en carcajadas... y dije que creía que podía asegurarle que el señor Galileo no era un hombre que escondiera grandes misterios bajo tales puerilidades y que había dicho con suficiente claridad lo que opinaba. Le declaré que creía poder afirmar que el emblema era cosa del impresor. Al oírlo pareció muy confortado y me dijo que si yo podía asegurarle que así era en realidad... el resultado sería muy satisfactorio para el autor".

El delfín era un elemento ciertamente común en la emblemática del renacimiento, pero el colofón que figuraba en el *Diálogo* no era un cliché estereotipado. La búsqueda de su significado "real" fue uno de los factores que suscitaron el primer desasosiego en Roma acerca de la obra. Riccardi se inclinaba favorablemente hacia Galileo y su agitación, junto con su referencia a que todo el asunto contra Galileo dependía del emblema, muestra lo importante que éste debió haber sido. No era infrecuente transmitir mensajes secretos por medio de símbolos. Las autoridades romanas se inclinaron a sospechar que Galileo y Landini habían forjado conjuntamente el emblema para esconder un mensaje o quizá para que actuara como clave o como sumario de la obra que venía a continuación.

Un carácter suspicaz podía descubrir connotaciones en el emblema que resultaban especialmente peligrosas para Galileo. En primer lugar, el delfín estaba asociado con el santuario del dios Apolo en Delfos. En la mitología griega Apolo era el padre de Asclepio, una de las figuras más importantes de los mitos herméticos. Además, en la *Ilíada* de Homero Apolo había sido el dios olímpico más significado entre los sostenedores de la causa troyana y uno de los supervivientes de Troya, Franco, había sido el fundador legendario de la dinastía real francesa. Para reforzar aún más esta línea de especulación, la palabra francesa "dauphin" está vinculada etimológicamente con "delfín". En el contexto de la Guerra de los Treinta Años, tal parenteso entre Troya y Francia podía prestarse a una grave interpretación errónea: como el paso del manto de Apolo –o en términos cristianos: el paso del Espíritu Santo que confiere autoridad al papa– de Roma al linaje colateral ascendente de los troyanos franceses.

Toda esta especulación se disipó más tarde. Tras un retraso embarazoso, Magalotti pudo dar finalmente a Riccardi otro libro de Landini, anterior al *Diálogo* galileano, con el mismo colofón. Sin embargo, por aquel entonces la leña estaba ya en el fuego: Riccardi había puesto el grito en el cielo por la teología de la *Carta a la Gran Duquesa*, sobre cuya existencia manuscrita había llamado la atención de una manera inhábil Magalotti. Ya hemos mencionado anteriormente algunas de las dificultades planteadas por la *Carta*; a partir de ese momento los adversarios de Galileo tenían argumentos más substanciales que rumiar.

Podemos describir ahora cómo la espúrea asociación de Galileo con la tradición hermética se enredó con la realidad política contemporánea y dio un poderoso ímpetu inicial a la maquinaria judicial en que quedó atrapado Galileo. Urbano VIII prefirió evitar los extremos opuestos de la ortodoxia religiosa y del entusiasmo contrarreformista. Sus inclinaciones políticas y personales le llevaron por un camino alejado de España y a acercarse a Francia. Como ya hemos mencionado, sin embargo, sus acciones había suscitado la cólera creciente de los españoles.

En 1631, el cardenal Gaspar Borgia, embajador español ante la Santa Sede, ejerció una presión cada vez más fuerte sobre el papa para conseguir su apoyo positivo a la causa española. Urbano se dio cuenta del peligro que representaba una hostilidad española creciente y se declaró dispuesto a intentar disuadir a Francia de una alianza con Suecia. A pesar de ello, el cardenal Borgia atacó abiertamente al papa en el consistorio, esto es, en la reunión de los cardenales en marzo de 1632. Urbano se puso furioso, pero se mantuvo pacífico por miedo a una ruptura abierta con Felipe IV de España.

Para ablandar a España, Urbano hubiera podido ponerse en contra de Francia, pero un movimiento así le hubiera hecho correr el riesgo de una ruptura abierta con la iglesia de Francia.

La única vía que le quedaba era hacer un gesto no muy sustantivo pero fuertemente simbólico. Podía sacrificar públicamente a una persona asociada con la política filofrancesa y la filosofía hermética de que necesitaba disociarse perentoriamente. Campanella representaba la elección más obvia, pues estaba conectado claramente no sólo con la política profrancesa, sino también con la filosofía subyacente a ella. Además se podía prescindir de él.

Pero Campanella sabía demasiado. Si se emprendía en contra suya una acción directa y fuerte, la historia, no muy edificante, de un papa que practicaba una magia herética se habría hecho pública con toda seguridad. La siguiente mejor elección era Galileo. Su asociación con Campanella a los ojos de la opinión pública queda subrayada por el hecho de que el redactor del informe preliminar elaborado por la comisión que investigaba el *Diálogo* escribió en primer lugar el nombre de Campanella en vez del de Galileo y tuvo consecuentemente que rascarlo.

Incluso con estas circunstancias apremiantes, Urbano hubiera podido muy bien buscar una víctima propiciatoria tanto más cuanto que durante mucho tiempo había tenido a Galileo en gran estima. Por desgracia, Galileo se había esforzado, con poco sentido de la oportunidad, por herir los sentimientos del papa. Urbano había sostenido que Dios podía haber cumplido sus fines de infinitas maneras; como dijo a Galileo, "no debéis forzar a Dios". Como Urbano sabía de las opiniones copernicanas de Galileo, le había señalado que no hiciera una elección definitiva entre los sistemas ptolemaico y copernicano. Galileo siguió las instrucciones al pie de la letra: el *Diálogo* finaliza con un pasaje que excluye cualquier elección entre las dos posiciones. Tal exclusión es claramente insincera y las opiniones de Urbano son puestas en la boca del dogmático y obtuso Simplicio. En consecuencia, Urbano no tuvo inconveniente en sacrificar a Galileo cuando se vio en la necesidad de sacrificar a alguien.

Vemos, pues, que convergen tres líneas. La situación política exigía una cabeza de turco. Los escritos de Galileo, interpretados por hombres inteligentes pero desconocedores de su verdadero objetivo, le convirtieron en un candidato apropiado. La supuesta burla que había hecho del papa le privó de la benevolencia de Urbano en un momento crucial. La tergiversación hermética de sus escritos había sido capaz de dar comienzo a unos acontecimientos que con posterioridad fueron apoyados por otras fuerzas.

Una de las explicaciones tradicionales menos convincentes de los problemas de Galileo es aquella que señala que su proceso siguió adelante por causa de la animosidad personal del papa. Los sentimientos de Urbano por sí solos no le hubieran inducido a poner en marcha en contra de Galileo la poderosa maquinaria de la Inquisición. La enorme disparidad existente entre las posiciones social y política de Urbano y Galileo hubiera hecho tal respuesta a una afrenta personal completamente inadecuada. Nuestra ampliación de la explicación vigente del proceso muestra cómo se puede entender la fuerte reacción de Urbano. Dadas las exigencias de estado y el hecho de que Galileo parecía satisfacer una necesidad política, la coincidencia momentánea entre esta necesidad y el resentimiento personal de Urbano hicieron que las cosas fueran mal para Galileo.

Resulta posible entender también las ambigüedades del comportamiento ulterior de Urbano con Galileo. Galileo era viejo y su salud mala cuando fue llamado a Roma, pero incluso cuando perdió la vista, Urbano rechazó airado la mitigación de las condiciones de su arresto domiciliario. Sin embargo, Urbano jamás trató de oponerse a la continua magnificación de Galileo en la que participaban incluso príncipes de la Iglesia. Urbano tampoco hizo ningún intento por oponerse de forma efectiva a la libertad de publicar de Galileo, cosa que seguramente hubiera hecho si hubiera considerado a Galileo peligroso fuera del contexto de la política española. Una vez que Galileo había servido a la necesidad de una víctima simbólica, las ulteriores acciones de Urbano parecían fruto de una cólera puramente personal antes que de una hostilidad oficial.

Así pues, Galileo fue una víctima simbólica en una época que ponía gran énfasis en los símbolos, al igual que lo había sido Bruno antes que él. Fue una víctima de reputación paneuropea y altamente visible; su castigo ejemplar enseñaba de nuevo la lección de 1600: que políticas contrarias a la casa de Habsburgo, profrancesas, conciliadoras en lo religioso, eran heréticas o al menos cercanas a la herejía. Sus enemigos y las circunstancias del momento hicieron una caricatura del Galileo verdadero y de esa manera se convirtió en un Bruno resucitado que llegó ante la Inquisición en 1633 para producir un mito en torno al cual pudiera tejerse una moraleja viviente.

# Juegos de ordenador

## *Star Trek emerge de las cavernas y se instala en los videojuegos domésticos*

A. K. Dewdney

Tiempo atrás solía quedarme hasta bastante tarde en mi despacho de la universidad, con la esperanza de trabajar sin interrupciones por parte de los estudiantes. Desdichadamente, justo al fondo del pasillo del laboratorio de investigación de gráficos por ordenador se celebraba la reunión nocturna de uno de los juegos favoritos de los alumnos, que unos llamaban Star Trek, y otros, "Viaje a las estrellas". Resonantes retumbaban a través de la puerta de mi despacho los gritos de "¡Dale, dale!" y "¡Cuidado con los misiles!" El griterío alcanzaba el nivel justo para impedirme razonar con ilación. Incapaz de vencer al Star Trek, acababa por unirme al grupo.

La partida de Star Trek consistía en una batalla entre la nave estelar *Enterprise* y un crucero de combate Klingon.

Aunque al principio Star Trek requería un potente ordenador de investigación de gráficos, hoy se programa sin dificultad en un ordenador personal. Las dos naves describen órbitas en torno a un sol central, disparándose misiles mutuamente y esquivando las andanadas de réplica. Tanto los misiles como las naves están sometidas a la gravedad, y gran parte de los acontecimientos están determinados por el movimiento orbital. Los pilotos inexpertos en mecánica celeste verán arder sus naves, sea por caer en el sol, sea por interceptar la engañosa trayectoria de un misil. Pierde el bando que quede primero sin su nave.

En cierto momento llegaron a contarse por centenares las universidades y otras instituciones que disponían de versiones de Star Trek; el juego, sobre el que pesaba la repulsa oficial, se gozaba en la clandestinidad. Me resultaba irónico que años después de aquellas tardías interrupciones nocturnas todavía recordase el entretenimiento con cariño. Star Trek era uno más de los muchos juegos ideados por los estudiantes; en su mayoría se abrieron pronto camino hacia programas comerciales, en gran medida responsables de la revolución de los ordenadores domésticos. Introducidas recientemente las versiones comerciales de Star Trek para ordenadores domésticos, la verdad es que desde hacía tiempo existían versiones en los salones recreativos de videojuegos.

La versión de Star Trek que aquí describo hará retornar al lector a la romántica clandestinidad de los primeros juegos computarizados. Además, sirve para introducir lo que denomino el arcano de la programación de videojuegos. Uno de los objetivos es que haya actividad en la pantalla; los cómputos encargados de crearla en Star Trek han de ser lo más rápidos y sencillos posible. Ya describí un problema similar en septiembre, al hablar de programas de simulación de vuelo. Afortunadamente, el mundo de Star Trek es mucho más sencillo que la detallada y minuciosa geografía digital que es preciso presentar a los pilotos de teclado. Un segundo objetivo de la programación es crear un ambiente gravitatorio verosímil y realista; por otra parte, muchos lectores se han topado con el mismo problema, aunque vestido de guisa un tanto diferente. Presenté en marzo un universo de salón, donde las estrellas danzaban de acá para allá, al compás de la mutua gravitación. También la gravedad, aunque de un tipo más sencillo, comba y arquea las sendas de naves y misiles en Star Trek; la única fuerza perceptible es la del sol.

Para entablar su duelo orbital, los dos jugadores se sientan frente al teclado de un ordenador y pulsan las teclas asignadas al control de sus naves. Uno de los jugadores, el más peludo quizá, toma el mando de la nave Klingon; el otro vela por la fortuna de la Federación, bando rival en su disputa por el dominio de la Vía Láctea. Al principio, la pantalla solamente está ocupada por las naves y el sol. El astro es un círculo y, las naves, iconos con los detalles justos para distinguir al amigo del enemigo.

Al comenzar la partida, ambas naves se encuentran en caída libre hacia el sol. Los jugadores proceden inmediatamente a maniobrar sus naves, apartándolas de la línea de caída: ponen en ignición sus motores cohete, que llevarán los vehículos a una órbita segura. En cuanto una nave toca el sol, se vaporiza y, como es obvio, ese bando pierde la partida.

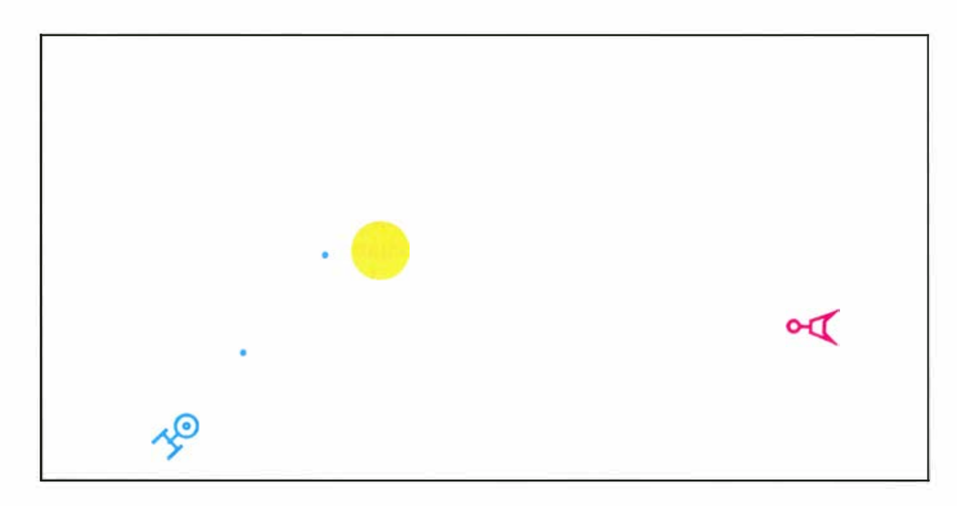
En cuanto se han establecido en las órbitas, los jugadores tratan de eliminar al oponente. Una táctica extrema consiste en permanecer "al pairo", hasta que la nave enemiga pase cerca. Una rápida andanada puede entonces eliminarla. La otra táctica extrema resulta algo más delicada: se lanzan los disparos desde un punto diametralmente opuesto, respecto del sol, al que ocupa el enemigo. Del navío que los dispara parten puntos brillantes, llamados torpedos fotónicos, desplegados en amenazante y airosamente curvada formación. A menos que la nave enemiga tenga un comandante en extremo avezado, el navío estará condenado a tropezarse con alguno de los misiles y explotará, desintegrado en un fogonazo de residuos interestelares. La pantalla señala el acontecimiento con una breve nube de puntos, y anuncia, sea VICTORIA DE LA FEDERACIÓN, sea VICTORIA DE LAS FUERZAS DE KLINGON.

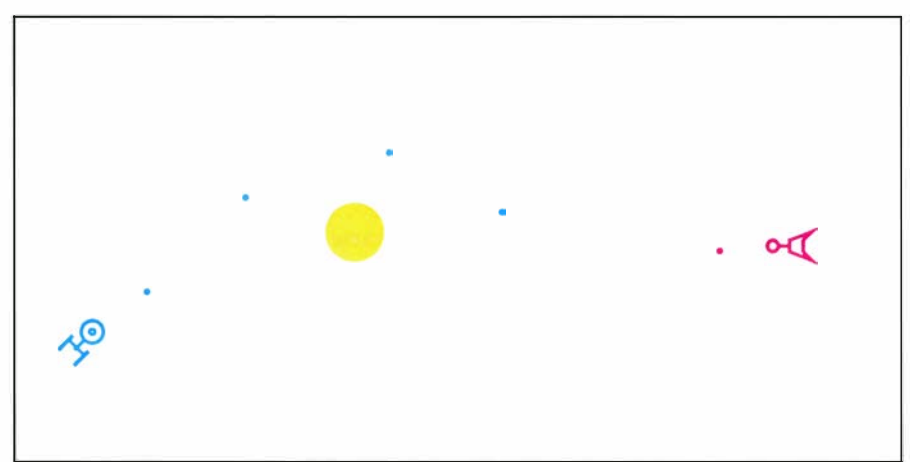
Dado lo intensas que son las acciones en la vecindad del sol, los jugadores más cautos prefieren describir órbitas más alejadas. La principal desventaja de esa estrategia es la necesidad de recargar las células de energía solar. El control de cada nave depende de su célula de energía. Cuando la célula se agota, la nave debe moverse rápidamente en la vecindad del sol, para recargar sus provisiones de fotones solares. En las órbitas alejadas, el flujo de fotones es débil, y la nave, sin timón, corre el riesgo de convertirse en blanco inerme.

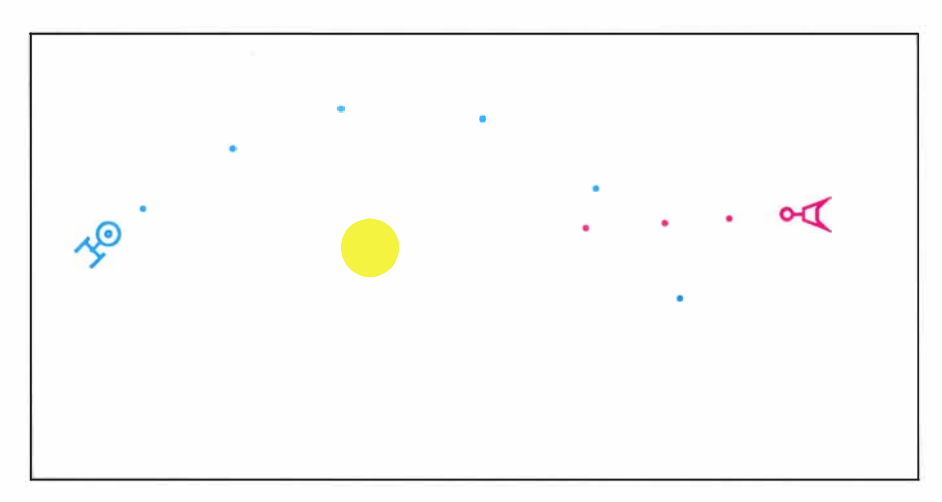
En el vuelo orbital a gran distancia debe tenerse presente otra característica: el campo de batalla de Star Trek es "toroidal": si la nave se acerca demasiado a uno de los bordes de la pantalla, desaparecerá de allí y reaparecerá cerca del borde opuesto.

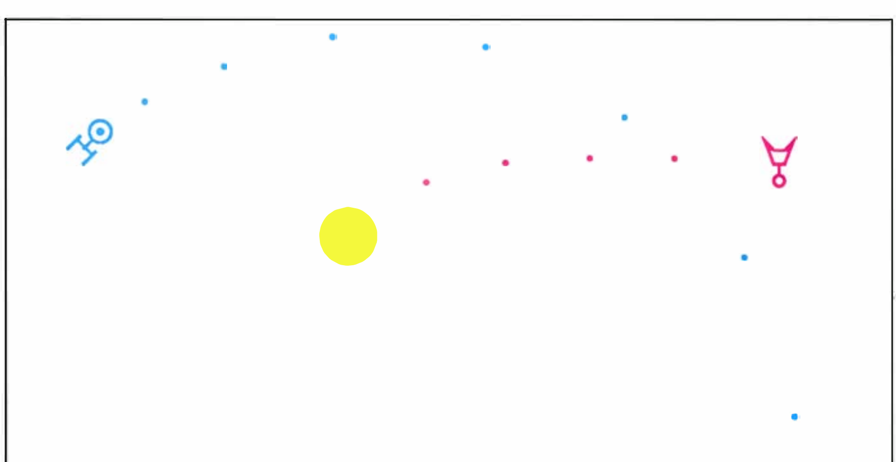
Aunque ambas naves disponen de un arsenal infinito de misiles, no puede haber más de 10 de ellos en vuelo simultáneo. Los misiles obedecen a las mismas leyes físicas que las naves; duran hasta que, hacen impacto en una nave (que puede ser la propia) o hasta que agotan su combustible. Y por lo que al juego se refiere, eso es todo.

El programa que llamo TREK es el más ambicioso de todos los presentados hasta la fecha en esta sección, pero no tanto en razón de su complejidad cuanto de su longitud. Sólo podremos









*1. La* **Enterprise** *y el crucero Klingon trabados en batalla de misiles*

esbozar algunas de las rutinas más corrientes. No obstante, incluso los programadores neófitos, y especialmente los conectados ya con asesores expertos a través de la red de asesoramiento [véase Juegos de ordenador, INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, febrero de 1986], pueden probar mano en el programa con esperanzas de éxito, y con la seguridad de entretenerse mucho.

Mientras las naves permanecen en servicio, TREK va recorriendo cíclicamente seis secciones de código:

Lectura de las teclas.
Actualización de las posiciones de naves y misiles.
Detección de contactos.
Actualización de la energía de las naves.
Control de los misiles.
Presentación.

Con la posible excepción del primer bloque, la mayoría de los lectores encontrarán que la redacción de TREK es relativamente inmediata. La lectura de teclas puede resultarle nueva a algunos de ellos; se trata de algo totalmente necesario en los videojuegos. La mayoría de los lenguajes de alto nivel disponen de enunciados que permiten al programa comprobar si se ha pulsado una determinada tecla.

Por ejemplo, en el lenguaje Microsoft BASIC, la instrucción al efecto es

On key($k$) gosub $n$.

Cuando se ejecuta el mandato "On key", el programa, antes de ejecutar la instrucción siguiente, examina si se ha pulsado, o no, la tecla $k$. De haberlo sido, el control del programa se transfiere a la línea $n$. La línea $n$ es el comienzo de una subrutina, cuyo propósito es registrar la pulsación de la tecla $k$, lo que hace, en general, asignando un determinado valor a una variable destinada a servir de "bandera de señalización". El teclado del IBM PC dispone de 14 teclas supervisables de este modo: las 10 teclas de función y las cuatro teclas de desplazamiento del cursor. Es preciso asignar cuatro teclas a cada jugador; por ejemplo, las teclas de función $F1$, $F2$, $F3$ y $F4$ a las fuerzas de la Federación y, las cuatro teclas de cursor, a las fuerzas Klingon. Los números $k$ correspondientes a esta asignación son del 1 al 4 y del 11 al 14. El manual resulta aquí indispensable.

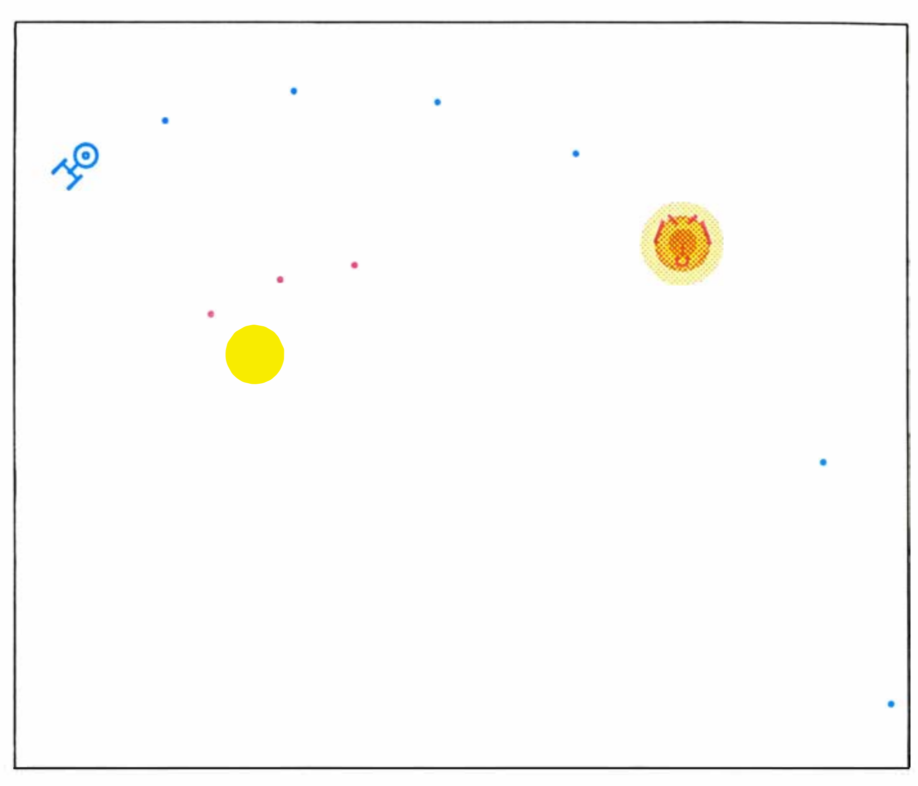
En cada bando, la primera tecla controla el empuje de los motores; las dos siguientes, la dirección en que mira la nave, y la última, el disparo de misiles. La tecla de empuje se limita a propor-

cionar un empuje fijo, a toda potencia, durante la duración de un ciclo de programa. Cada vez que se pulsa una tecla de dirección, el correspondiente navío espacial gira un ángulo de 10 grados. Una pulsación de la tecla de disparo produce el lanzamiento de un misil. Conviene pegar pequeñas etiquetas adhesivas sobre las teclas de control; rotuladas con símbolos adecuados, facilitarán a los contendientes la tarea de saber qué función corresponde a cada una de ellas. El programa TREK tiene que incluir un mandato "On key" para cada una de las ocho teclas de control designadas. "On key" no se ejecuta, a menos que vaya precedida del mandato "Key(*k*) on".

Todas las subrutinas invocadas en TREK por el procedimiento anterior son sencilla, y fundamentalmente, la misma. Cada subrutina se compone de dos instrucciones. La primera instrucción asigna el valor 1 a una "bandera", que posteriormente será consultada por el programa; la segunda provoca el "retorno", es decir, que la ejecución del programa continúe en la línea inmediatamente siguiente a la instrucción "On key" que invocó la subrutina. Las variables de control (las "banderas") de la *Enterprise*, nave insignia de la Federación, podrían muy bien llamarse *fdav*, *fddr*, *fdiz* y *fdfu*, que significan, "Federación avante" (encendido de los propulsores), "Federación derecha" (giro en el sentido de las agujas del reloj), "Federación izquierda" (giro antihorario) y "Federación fuego" (lanzamiento de un misil). Análogos significados para las variables Klingon : *knav*, *kndr*, *kniz*, *knfu*, que registran la propulsión, dirección y lanzamiento de misiles del crucero de combate Klingon.

El efecto de poner a 1 alguna de las "banderas" de las subrutinas es desencadenar un cambio en una de las astronaves. Por ejemplo, cuando se pone a 1 la bandera *fdav*, el segmento de programa encargado de actualizar la posición de la nave añade una pequeña aceleración (entre 2 y 5, según gustos) a la aceleración actual de la *Enterprise*. Seguidamente, TREK debe reponer a 0 la bandera.

La actualización de las posiciones de las dos astronaves y de unos cuantos misiles resulta mucho más sencilla que la gestión y control del mismo número de estrellas con masa. La masa total de las naves y misiles es despreciable comparada con la del sol central, por lo que se supondrá que las atracciones mutuas entre naves y misiles son nulas. Dada la distancia de cada objeto al sol, TREK se limita a calcular la aceleración que experimenta el objeto por efecto de la



*2. La nave Klingon no logra esquivar la barrera de misiles*

gravedad, dirigida hacia el sol central; actualiza luego la velocidad del objeto y, finalmente, revisa su posición.

Pero hasta un cálculo conceptualmente tan sencillo exige un importante esfuerzo de cómputo. En cada cálculo es preciso efectuar sumas, productos y raíces cuadradas. Para evitar que por culpa de los cálculos aritméticos el juego sea excesivamente lento, TREK consulta una tabla que, precalculada y llamada *fuerza*, da la aceleración que experimentan los objetos, correspondiente a cada posible distancia al sol [*véase la figura 3*]. Dado que el universo de Star Trek es tórico, la nueva posición derivada de la aceleración que da la tabla tiene que calcularse módulo la anchura horizontal o altura vertical de la pantalla de presentación.

Dos tablas dan la velocidad y posición actuales de las dos naves y de un máximo de 20 misiles; esas dos tablas se llaman *vel* y *pos*. Cada tabla consta de dos columnas y 22 filas. Las dos primeras filas contienen datos sobre las naves; las otras 20 son para los misiles. Así pues, en la primera fila de *vel*, las dos casillas *vel*(1,1) y *vel*(1,2) son, respectivamente, la componente horizontal de la velocidad (según el eje *x*) y la componente vertical (en la dirección del eje *y*) de la *Enterprise*. Análogamente, *vel*(2,1) y *vel*(2,2) dan las dos componentes, mutuamente perpendiculares, de la velocidad del crucero Klingon. Una variable especial, llamada *misnum*, da el número de misiles que se encuentran en vuelo en cada momento. *Misnum* puede ir desde 2 (no hay misiles) hasta 22 (20 misiles).

Al apilar en unas mismas tablas los datos de astronaves y misiles se logra un programa algo más corto y ligeramente más eficaz. Se requiere un bucle para la actualización de posiciones y velocidades. Sin embargo, antes del ciclo de actualización, hacen falta dos variables que vayan registrando las orientaciones de las dos astronaves: *fdor* y *knor*. Ambas se expresan en grados; el ángulo 0 indica que la nave mira al este; 90, que apunta al norte; y así sucesivamente. Cada vez que el jugador pulsa una de las teclas de orientación, una de las dos variables se incrementa o decrementa en 10 grados.

El bucle de actualización de posiciones está subindiciado por la letra *i*, que recorre los valores de 1 a 22. El programa calcula la aceleración correspondiente a cada valor de *i*; para ello, se elevan al cuadrado y se suman los valores actuales de *x* e *y* que contenga la *i*ésima fila; seguidamente, TREK calcula la raíz cuadrada de la suma y, de ese número, se toma la parte entera. Esa raíz entera por defecto expresa de manera aproximada la distancia del sol a la que se encuentra el objeto. Tal entero sirve entonces como índice de entrada en la tabla de aceleraciones, en la cual se consulta la atracción ejercida por el sol.

Seguidamente es preciso sumar a las componentes del empuje de las dos na-

ves las componentes de la aceleración gravitatoria solar. Si alguna de las banderas *fdav* o *knav* se ha puesto a 1 (en otras palabras, si se ha pulsado la tecla de propulsión), y si ninguno de los navíos ha agotado su combustible, TREK tiene que multiplicar el empuje, que es constante, por las componentes horizontal y vertical. En mi monitor he tomado la constante de empuje igual a 3, que da a las astronaves una maniobrabilidad razonable. Así pues, la componente horizontal del empuje de la *Enterprise* será de 3 veces el coseno del ángulo *fdor* y, su componente vertical, 3 veces el seno de *fdor*. Las componentes del empuje de la nave Klingon se deducen del ángulo *knor*. En cuanto se han efectuado los cálculos, TREK repone a 0 los valores de *fdav* y de *knav*; el acelerador se desconecta hasta la siguiente pulsación de la tecla de propulsión.

Cuando el índice *i* sea mayor que 2, se debe pasar por alto el cálculo del empuje, porque los misiles no tienen propulsión. El resto del bucle de actualización está consagrado al cálculo de las nuevas velocidades y posiciones de los objetos de la pantalla. Para cada uno de los objetos, se va sumando la magnitud numérica de la aceleración a la de la velocidad, y la magnitud de la velocidad se suma a la de la posición. Tan simplista cálculo se funda en que el empuje y la atracción solar se han ajustado para que sean reflejo de un sistema de unidades que hace corresponder a cada ciclo de programa con el transcurso de una unidad de tiempo.

Para detectar los contactos entre los diversos objetos, el programa debe primero determinar si la nave se encuentra en la frontera del sol, o en su interior. Dado que TREK ha calculado ya la distancia de cada nave al sol, le basta con comparar la distancia con el radio solar, que supondremos, por ejemplo, de 10 unidades. Si alguna nave ha chocado con el sol, TREK responde mostrando en la pantalla un mensaje adecuado, tal como NAVE KLINGON: VAPORIZADA; en caso contrario, el programa pasa a la sección de presentación.

| DISTANCIA | FUERZA |
|---|---|
| 10 | 8.000 |
| 11 | 6.612 |
| 12 | 5.556 |
| . | . |
| . | . |
| . | . |
| 178 | .025 |
| 179 | .025 |
| 180 | .025 |

$$\text{FUERZA} = \frac{800}{(\text{DISTANCIA})^2}$$

*3. Tabla típica de fuerzas atractivas y fórmula utilizada*

Una segunda detección de contacto tendrá que determinar, para cada misil, si se encuentra a una pequeña distancia, dada de antemano, de alguna de las dos naves. En ese caso, TREK recurre a una simplificación, burda, pero efectiva: halla el valor absoluto de la diferencia de abscisas entre naves y misiles; y lo mismo, de la diferencia de ordenadas. Finalmente, suma esas diferencias; el proceso evita tener que elevar al cuadrado las diferencias y la extracción de la raíz cuadrada de la suma. El resultado es casi tan bueno como el cálculo ordinario de la distancia. Cuando la suma de las diferencias es, por ejemplo, menor que 4, el programa acusa un impacto. Aparece entonces un mensaje en la pantalla, del estilo de NAVE ENTREPRISE ALCANZADA POR MISIL. KLINGON VENCE. Un bucle simple efectúa la comprobación para todos los misiles. Su índice comienza en 3 y termina en *misnum*, que es el número de misiles que hay en el firmamento, más 2.

Para actualizar las reservas de energía de las naves, el programa divide entre 60 la aceleración gravitatoria solar tomada de la tabla. Dado que la aceleración aumenta al aproximarse la nave al sol, tal nave puede recibir entonces una corriente más concentrada de energía fotónica procedente del sol. Tal energía se suma a una variable indicadora de combustible, llamada *fdcb* y *kncb*, según del navío de que se trate. Cada vez que se encienden los propulsores, la variable se decrementa en 0,1; los decrementos se efectúan durante la sección de actualización de posiciones de TREK. Se considera que la nave ha agotado el combustible cuando no queda en sus tanques más de una unidad de energía solar. Al empezar el juego, los tanques de las naves tienen 10 unidades de combustible solar.

Para la gestión de los misiles se requiere una tabla llamada tiempo, que almacena el número de ciclos de programa que ha sobrevivido cada misil. Cuando el número de ciclos llega a 25, se elimina de la tabla *pos* el correspondiente misil, su recuento se repone a 0 y *misnum* se decrementa en 1. Hay dos posibles procedimientos para eliminar el misil de la tabla pos. El primero de ellos es el más fácil de programar, pero puede hacer más lento el desarrollo del juego. TREK repasa la tabla a partir del valor del índice del misil a eliminar y rebaja en 1 el número de fila de cada casilla. Así, por ejemplo, la última casilla a modificar se encuentra en la posición de índice *misnum*. Es preciso trasladarla a la fila de índice *misnum*−1. La misma operación debe efectuarse para las tablas *vel* y *tiempo*.

Existe otra técnica más rápida, basada en la observación de que los misiles más antiguos son necesariamente los de índice más bajo, pues fueron los primeros misiles añadidos a la lista. Así pues, puede llevarse control de los misiles sin tener que desplazar sus índices; los misiles cuya edad haya llegado a 25 ciclos de programa tienen forzosamente que encontrarse todos en el comienzo de un grupo contiguo, y ello, en cada una de las tablas; así, sólo ésos serán los que deba eliminarse. Análogamente, los nuevos misiles se añaden siempre al final de un grupo contiguo.

Introduzcamos dos nuevas variables, llamadas *viejo* y *nuevo*, que sirvan de indicadores para los misiles más antiguo y más moderno de cada tabla. Para añadir y eliminar misiles basta cambiar los valores de *viejo* y *nuevo*. Se puede entonces aplicar aritmética modular, para mantener en circulación el grupo contiguo de misiles en torno a cada tabla. Cuando debe añadirse un misil nuevo, con índice de valor 23, TREK reduce el índice a 0, porque lo toma módulo 23, y después suma 3, para evitar sustituir las coordenadas de las naves por coordenadas de misiles. Las variables *viejo* y *nuevo* se someten al mismo proceso. Tales estructuras de datos se llaman colas circulares. Si se va a utilizar este truco, típico de los videojuegos, será preciso modificar el segmento de actualización del programa: debe escindirse cada bucle sencillo en dos bucles más pequeños, uno para las naves y otro para los misiles.

Cuando un jugador pulsa el lanzamiento de misiles, TREK empieza por consultar el número de misiles activado por ese bando. Si la cuenta es menor que 10, TREK consulta los valores de las banderas *fdfu* y *knfu*. Si, por ejemplo, *fdfu* es 1, el programa añade 1 al número de misiles de la Federación, incrementa *misnum* en 1 y seguidamente carga las coordenadas de posición y las componentes de la velocidad de la *Enterprise* en los correspondientes lugares de *pos* y *vel*. En el proceso, el programa debe incrementar la posición en 4 unidades y, la velocidad, en 2; en am-

bos casos, los incrementos han de hacerse en la misma dirección y sentido en que se esté moviendo la nave en ese momento. Por ejemplo, la posición horizontal de un misil disparado por la *Enterprise* será igual a la coordenada de la posición horizontal de la nave, más cuatro veces el coseno de *fdor*. La posición vertical se incrementa en cuatro veces el seno de *fdor*. La posición inicial del misil está lo suficientemente despejada de la nave para que no se produzca la inmediata destrucción de la nave por su propio torpedo de fotones. La misma operación, efectuada sobre las componentes de la velocidad, refleja una velocidad de lanzamiento relativa a la nave de 2 unidades por ciclo: los misiles viajan más rápidamente que la nave que los lanza, a razón de dos unidades por ciclo.

El último de los grandes bloques de que consta TREK se encarga de presentar en la pantalla el sol, las dos naves y los misiles que se encuentren activos en cada instante dado. El programa traza en el centro de la pantalla un círculo de radio 10, y seguidamente empieza a recorrer la tabla *pos*. Las naves de la Federación y el crucero Klingon se representan mediante iconos. Uno de ellos es, esencialmente, un círculo, que recuerda la célebre forma discoidal de la *Enterprise*, con sus dos toberas gemelas. El crucero Klingon es más anguloso. Los lectores son libres de probar con cualesquiera variaciones de estas naves, con tal de que en la pantalla queden razonablemente claras dos cosas: qué nave es cuál y hacia dónde apunta cada una. Para trazar el icono de cada nave espacial, TREK invoca una lista de puntos a presentar, que es preciso trasladar y girar, a fin de reflejar la posición y orientación de cada objeto. Para realizar esas operaciones, el programa consulta la tabla *pos* y las variables *fdor* y *knor*.

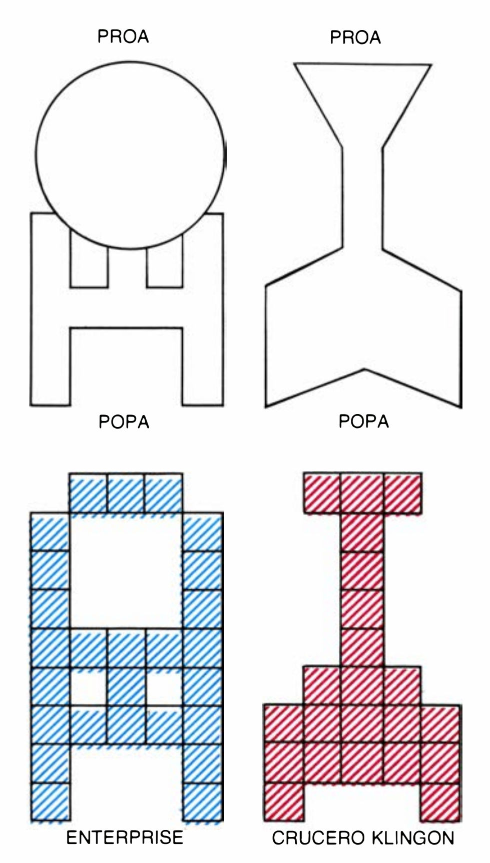
Los misiles son mucho más sencillos. En cada ciclo, el programa de presentación simboliza cada misil mediante un único punto, consultando *pos* para irlo dibujando donde convenga.

TREK padece de uno de los inconvenientes de las pantallas de presentación hoy al uso; funciona en el llamado modo de almacenamiento: cuando se dibuja un objeto en la pantalla, permanece en ella. Para evitar una fastuosa confusión de naves y misiles supervivientes, TREK ha de dibujar dos veces cada objeto. Primero lo redibuja con el color de fondo de la pantalla, en su antigua posición, y luego vuelve a dibujarlo en la posición nueva, en el color que le corresponda.

Dejaré la tarea de inicialización del programa a los "trekkers" que intenten programarlo. A pesar de que la programación se vale de técnicas propias de los videojuegos, a muchos les parecerá, posiblemente, que el juego va demasiado lento; seguramente se sentirán tentados de llamarlo Star Parao. Para mejores resultados, pruébese a compilar el programa, o impónganse limitaciones al número de misiles de que dispone cada bando.

He descrito nada más los puros huesos de una versión de Star Trek. Se han construido versiones mucho más refinadas, aunque también más especializadas, que no dejan de propagarse; juegos que permiten simultanear tres o más naves, cañones de láser, gráficos en colores y presentación de posiciones, velocidades, combustible, etcétera. Quiero expresar mi agradecimiento a Jonathan N. Groff, de Clearwater, Florida, por recordarme este clásico *underground* y por presentarme una versión del juego que dispone de un Klingon automatizado: elimina sistemáticamente todo terrícola, representante de la Federación.

Para terminar, invito a los lectores que logren poner a punto una versión operativa de TREK tengan a bien escribirme refiriéndome sus propias tácticas para acelerar el juego. En un artículo posterior daré cuenta de los mejores resultados.



*4. Los iconos* (**arriba**) *y sus plasmación en pixeles*

La inmensa mayoría de las cartas relativas al artículo sobre magia informática, publicado en esta sección el pasado octubre, pretendieron resolver una de las cuestiones cuya solución ya apareció en noviembre: ¿de qué modo podía el mago, con auxilio de una calculadora de mano, leer el pensamiento del sujeto? La solución se fundaba en que cualquier número compuesto por dígitos colineales del teclado de la calculadora tiene que ser divisible por 3. No repetiré la explicación del truco, pero sí deseo distinguir entre los dos tipos de problemas que habitualmente se plantean en esta sección.

Un encuentro intelectual en la primera fase suele consistir en un problema puramente mental, que quedará resuelto ya en el número siguiente. Tales cuestiones van acompañadas de la advertencia de que la respuesta se dará de inmediato. Por consiguiente, la solución puede estar en prensa mucho antes de que lleguen, esperanzadas, las primeras cartas.

Los encuentros intelectuales en la segunda fase suelen depender de la mente y de la materia. De ordinario, las condiciones necesarias para resolver este tipo de problemas son alguna reflexión y un ordenador; habitualmente se solicita a los lectores que respondan a ellos. Aquí se dispone ya de algo de tiempo para "bricolear". Las respuestas enviadas entre dos y tres semanas después de la publicación de la revista tienen posibilidades de hacer la travesía de mi mesa de trabajo antes de que salga para la imprenta el resumen de las respuestas.

El resumen correspondiente suele aparecer tres meses después del artículo que las suscitó.

Carlos Fulves, de Teaneck, New Jersey, ha propuesto un curioso giro para el truco de la calculadora. Lo mismo que antes, el mago le pide al voluntario que seleccione dos números de tres cifras colineales, y que las multiplique utilizando la calculadora. En la versión que yo presenté propuse que el voluntario se guardase una de las cifras del producto; el mago procede entonces a "adivinarlo" por el sistema de "expulsar los nueves". Se logran exhibiciones más impresionantes por adición de un indicio canino (o felino) que sirva para despistar. El voluntario no se reserva nada; antes bien, suma al número la edad de un animal de compañía. Si la edad del animalito no es mayor que 9, el mago puede recobrarla fácilmente: "Señora, mis dotes de adivinación me permiten saber que su perrita Chispabella tiene 5 años".

# Taller y laboratorio

## *El hiperescopio y el pseudoscopio facilitan la experimentación sobre la visión tridimensional*

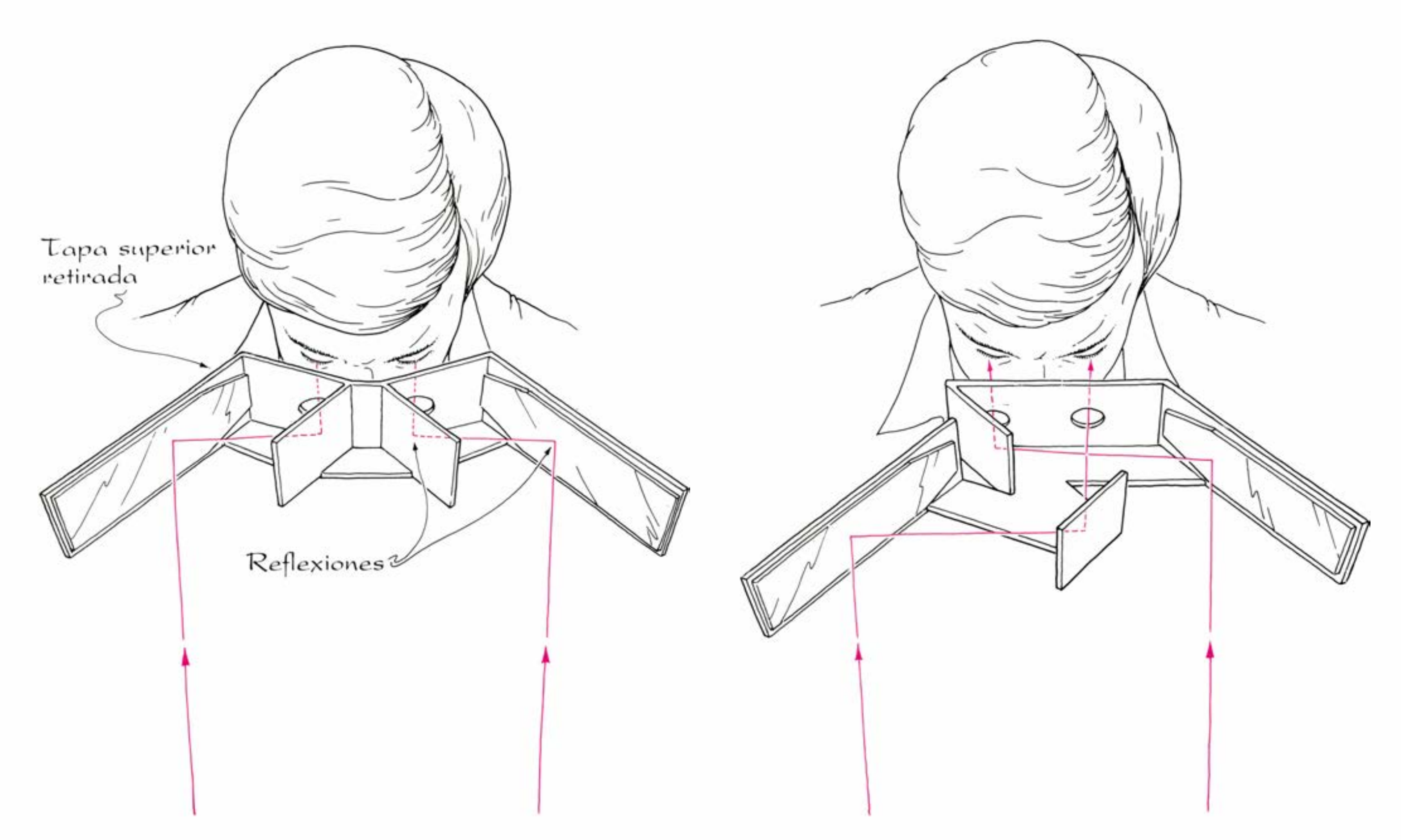
Jearl Walker

Nuestro sistema visual percibe los objetos en tres dimensiones; sin embargo, las imágenes que se forman en la retina son bidimensionales. ¿Cómo puede ser así? La razón estriba en que, en las imágenes retinianas, se encuentran múltiples indicios que nos facultan para crear la percepción de profundidad al contemplar una escena. Terry Pope, de la Universidad de Reading, ha ideado dos instrumentos que permiten alterar esas señales y realizar, así, experimentos en torno a la percepción tridimensional.

Esos indicios acerca de la distancia y profundidad pueden agruparse en cinco categorías: convergencia, disparidad retiniana, acomodación, paralaje del movimiento y señales pictóricas. La convergencia se refiere al ángulo que forman las visuales que parten de cada ojo cuando miramos directamente a un objeto. La disparidad retiniana remite a la diferencia en las posiciones de las imágenes en cada retina. Por acomodación se entiende la variación que experimenta la forma del cristalino cuando enfoca un objeto sobre la retina. La paralaje del movimiento es el movimiento relativo entre los objetos próximos y lejanos a través de nuestro campo visual cuando nosotros nos movemos o los objetos se mueven. Las señales pictóricas dan aquella información acerca de la profundidad que puede percibirse incluso en una pintura plana; entre ellas se cuentan las líneas de perspectiva, la ocultación parcial de un objeto por otro, sombras, degradaciones y la variación con la distancia de la densidad de las texturas.

En la mayoría de las percepciones tridimensionales, intervienen la convergencia y la disparidad retiniana. Su efecto puede explicarse mediante el concepto de eje visual, o simplemente visual, que es una recta imaginaria que une cada objeto con su imagen en la retina cuando lo miramos directamente. Supongamos que miramos directamente a un objeto $A$. Su imagen se encuentra en la visual y, por ello, en el mismo lugar de la retina de cada ojo, lo que permite al cerebro fundir ambas visiones en una percepción única. El ángulo que forman las dos visuales se llama ángulo de convergencia y es función del ángulo que deben girar los ojos para dirigir sus visuales hacia $A$. Ese ángulo lo asocia el sistema visual con la distancia al objeto de modo tal que, cuanto mayor sea, más cercano parecerá el objeto.

Al mirar directamente hacia $A$, las imágenes de un objeto $B$ más distante ocupan posiciones distintas en cada re-




*1. Hiperescopio y pseudoscopio de Terry Pope*

tina. Entonces, el sistema visual interpreta esa disparidad como un indicio de profundidad entre *A* y *B*. Ese reconocimiento puede asimismo explicarse en función de los ángulos de convergencia. En efecto, al mirar directamente *B*, el ángulo entre las visuales es menor que al mirar *A*; por tanto, *B* debe estar más lejos que *A*.

La disparidad retiniana depende parcialmente de la separación entre ambos ojos, la cual es del orden de seis centímetros. Pope se propuso investigar qué ocurre con la percepción si esa separación varía. Uno de sus instrumentos, el hiperescopio, produce el efecto de aumentar la separación hasta unos 20 centímetros, mediante reflexiones en espejos. En el siglo XIX, Charles Wheatstone y David Brewster estudiaron instrumentos similares.

El aumento de la distancia efectiva entre los ojos aumenta la disparidad retiniana entre las imágenes formadas en las retinas y la diferencia entre los ángulos de convergencia cuando se mira a un objeto y luego a otro situado a una distancia diferente. Supongamos que se mira *A*, a través del hiperescopio, mientras *B* se halla asimismo a la vista. La nueva disparidad de separación entre las imágenes de los dos objetos en las retinas nos fuerza a percibir una mayor profundidad entre ambos. Además, esa mayor profundidad la percibimos también a causa de que la diferencia entre los ángulos de convergencia es ahora mayor.

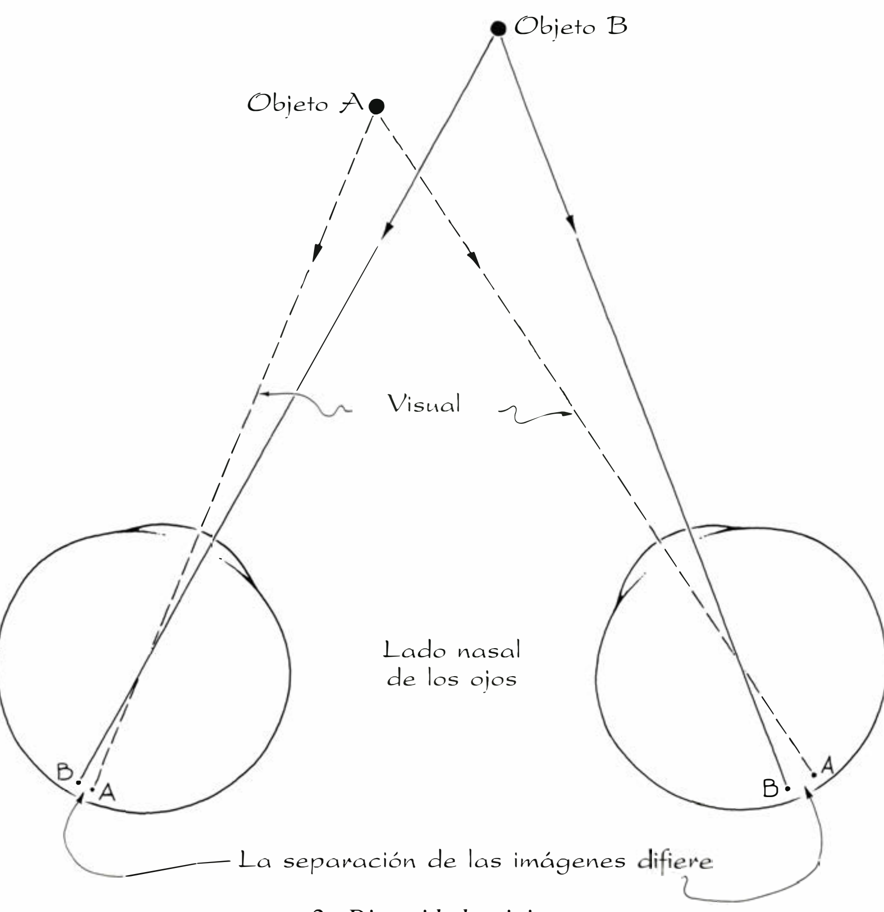
El hiperescopio altera también la altura y la anchura aparente de los objetos cercanos. En la visión normal, estamos acostumbrados a relacionar de un cierto modo el tamaño de la imagen de un objeto en la retina con la distancia que nos separa del objeto, y ello merced a la convergencia de los ojos cuando lo contemplamos. A través del hiperescopio, los objetos parecen más pequeños porque el ángulo necesario para verlos, a través de los espejos, es mayor que lo normal.

A través del hiperescopio, numerosos objetos familiares cobran una extraña apariencia. Por ejemplo, los rostros humanos parecen más flacos y presentan unas narices prominentes. Si se cierra un ojo, a la vez que con el otro se sigue mirando por el instrumento, todos los objetos recuperan su apariencia normal. Ello se debe a que ya no podemos comparar la disparidad retiniana ni los ángulos de convergencia entre ambos ojos; sólo nos quedan los indicios pictóricos acerca de la profundidad.

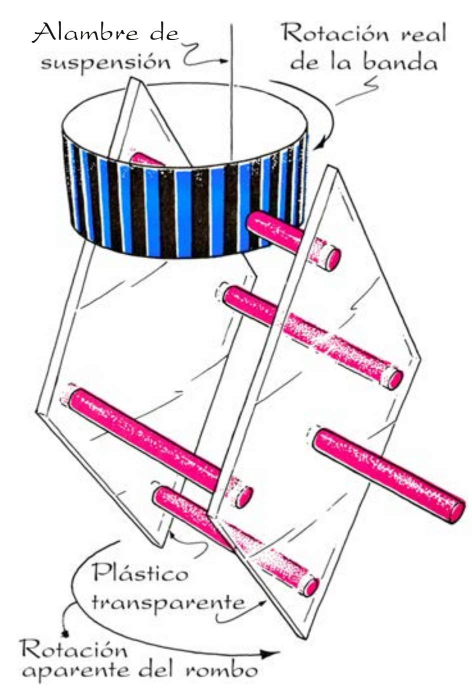
Otro de los instrumentos de Pope, el pseudoscopio, se vale de espejos para permutar lo que los ojos ven. Ese intercambio invierte las señales sobre la distancia dadas por la disparidad retiniana y hace, a veces, que un objeto distante parezca más cercano que otro en realidad más próximo. Ese intercambio de profundidades resulta más importante cuando se contempla, por el pseudoscopio, escenas complejas: árboles o maleza. Las ramas de la parte posterior de un árbol parecen más cercanas que las delanteras. Esta visión es desconcertante porque, a la vez, uno se da cuenta de que las ramas delanteras obstaculizan, en parte, la vista de las posteriores. La profundidad se invierte también cuando se mira un objeto que sea mentalmente invertible. Por ejemplo, una olla que cuelgue con el fondo hacia fuera en la pared de una cocina parecerá, de golpe, combarse hacia dentro, y no hacia fuera.

Pope ha realizado varias construcciones de plástico transparente que parecen moverse de modo sorprendente cuando un pseudoscopio las invierte. Una de ellas es un rombo compuesto por dos paralelogramos de plástico, sujetos entre sí mediante cuatro varillas metálicas. Ese rombo cuelga de un alambre delgado. En su parte superior, lleva una banda de franjas alternativamente verdes y negras, la cual se sujeta merced a una de las varillas, que la atraviesa.

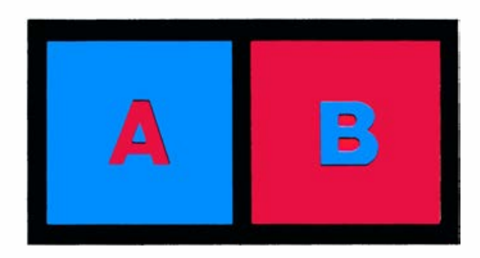
Colgué este dispositivo del brazo de una lámpara de techo, roté el rombo para retorcer el alambre, lo solté y lo observé por el pseudoscopio, desde




*2. Disparidad retiniana*




*3. Rombo de Pope*




*4. Fenómeno de estereoscopía cromática*

una distancia de unos cinco metros. Al principio, el rombo y la banda giraban juntos, primero en un sentido y después en el contrario, a la vez que el alambre se torcía y enderezaba. Pero, de repente, se invirtieron en el rombo anverso y reverso y, a partir de ese momento, el rombo y la banda parecieron rotar en sentidos contrarios. Pese a saber que ambos objetos estaban rígidamente unidos, si no cerraba un ojo, no conseguía desprenderme de la ilusión de que rotaban en sentido opuesto.

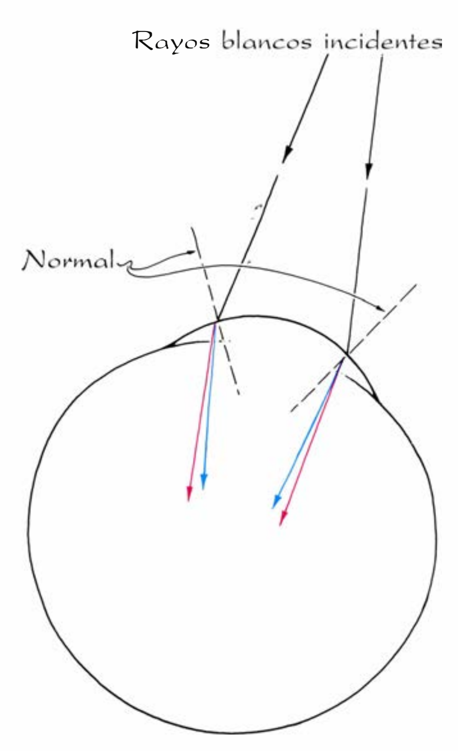
Si a alguien le interesa adquirir un hiperescopio, un pseudoscopio o un aparato llamado duoscopio, en el que se combinan los dos primeros, puede escribir a Pope: Scope Productions, 102 Newbury, Berkshire, Gran Bretaña RG16 9HJ. En particular, Pope puede diseñar versiones de gran tamaño, adecuadas para museos.

Mediante zonas contiguas de colores diferentes, ciertos anuncios publicitarios consiguen sugerir una impresión de profundidad. Por ejemplo, bajo una iluminación intensa, unas letras rojas pequeñas sobre un fondo azul parecen resaltar sobre éste. Esta ilusión se refuerza al alejar el texto. Conforme se atenúa la iluminación, las letras parecen acercarse al plano hasta coincidir con él para, después, descender por debajo de éste. Bajo una iluminación muy débil, la impresión de profundidad desaparece. Los colores del espectro situados entre el rojo y el azul originan unas sensaciones de profundidad más leves.

La ilusión de profundidad en ilustraciones coloreadas se debe a que el ojo disemina los colores (fenómeno llamado dispersión o aberración cromática) y al hecho de que el centro de la pupila no está en la visual que atraviesa la pupila. Cuando los rayos luminosos atraviesan la córnea del ojo, se refractan, y los colores componentes se diseminan. La refracción se mide con respecto a una recta (la normal) perpendicular a la superficie en el punto de refracción. Si el rayo incidente es blanco, el rayo azul refractado estará más cerca de la normal que el rojo. Los colores intermedios se refractarán, a su vez, bajo ángulos también proporcionalmente intermedios.

Como la córnea es curva, las normales a ella en los distintos puntos de su superficie están orientadas según direcciones diferentes. Así pues, los rayos que penetran en la córnea por el lado de la nariz se refractan en direcciones distintas de las que se refractan los que penetran por el lado de la sien. El grado de dispersión en cualquier punto depende del ángulo entre el rayo incidente y la normal, de tal modo que cuanto mayor es ese ángulo tanto mayor resultará la dispersión. En el cristalino del ojo tiene lugar una dispersión adicional.

Para poner de manifiesto esta ilusión, llamada fenómeno de estereoscopía cromática, se pegan dos pequeños círculos, uno azul y el otro rojo, sobre una tarjeta negra. Esos círculos se pueden recortar de cartones de colores de tonalidades puras que se usan como referencia en la impresión y en la fotografía en color. También pueden servir círculos tintados con plumas ordinarias, pero los colores impuros debilitan la ilusión. Los círculos se colocan muy cerca uno del otro, situando el rojo a la izquierda. La tarjeta se sostiene bajo una luz intensa y se mira directamente al círculo rojo, ajustando convenientemente la distancia para enfocarlo. En cada ojo, los rayos de luz procedentes del círculo se refractan en la córnea, atraviesan la pupila y se interceptan, formando una imagen nítida en el punto donde la visual corta a la retina. Si el segundo círculo fuese también rojo, formaría una imagen nítida a un lado de la primera. Pero, cuando ese círculo es azul, la imagen resulta borrosa. Los rayos azules se refractan adicionalmente y, por ello, se interceptan delante de la retina; en el momento en que llegan a ésta, se dispersan. Tal es la causa de que produzcan una imagen borrosa.




*5. Dispersión cromática*

Hay dos razones por las que el centro de la imagen borrosa azul no cae sobre la imagen nítida. Primero, bajo iluminación intensa, la pupila se contrae y su centro se halla del lado de la sien de la visual. Los rayos luminosos pueden penetrar en el ojo más alejados del eje por ese lado que por el otro, con lo que desplazan la imagen borrosa hacia el lado nasal del eje. Segundo, el trayecto sesgado de la visual a través del cristalino descentra aún más la posición de la imagen borrosa. La recta de simetría del cristalino se encuentra en el lado de la sien; formando un ángulo de unos cinco grados con la visual. Así, la luz que atraviesa el cristalino por el lado de la sien se dispersa más que la que lo hace por el lado nasal. Entonces, la disposición de la imagen azul en el lado nasal de la imagen roja crea la ilusión de que el círculo azul esta más lejos que el rojo.

Esa profundidad aparente no se altera si cambiamos la mirada y enfocamos la vista con toda precisión en el círculo azul. En este caso, la imagen yacerá, en cada ojo, en el punto donde la visual intercepta la retina. Los rayos rojos, que se refractan menos fuertemente, tienden a enfocarse tras la retina; cuando llegan a ésta, forman una imagen borrosa, el centro de la cual se halla en el lado de la sien de la imagen azul. Así, también ahora el círculo azul parecerá más lejano porque la imagen azul sigue hallándose en el lado nasal de la imagen roja.

Las posiciones relativas de las imágenes coloreadas cambian al decrecer la iluminación, pues cada pupila se ensancha excéntricamente y su centro se desplaza hacia el lado nasal del ojo. Entonces, cuando el centro de la pupila alcanza la visual, el centro de la imagen borrosa coincide casi con la imagen nítida. Los círculos parecen, entonces, equidistar del observador.

Cuando la iluminación disminuye todavía más, las pupilas aumentan su dilatación y sus centros se separan de la visual hacia el lado nasal de cada ojo. Esta migración desplaza la imagen

azul, a través de la retina, hacia el lado de la sien de la roja. La profundidad percibida por el sistema visual se invierte, pues, con respecto a la situación inicial.

Muchos observadores no son capaces de discernir profundidad alguna en figuras de este tipo, mientras que otros ven las letras siempre por encima o siempre por debajo del fondo, aun cuando el nivel de iluminación varíe. Sospecho que, en el primer grupo, el conocimiento que tiene el observador de que los círculos son equidistantes neutraliza la ilusión. En el grupo que sí percibe una disparidad, el centro de la pupila puede estar a uno u otro lado de la visual, con independencia de la variación en la anchura de la pupila.

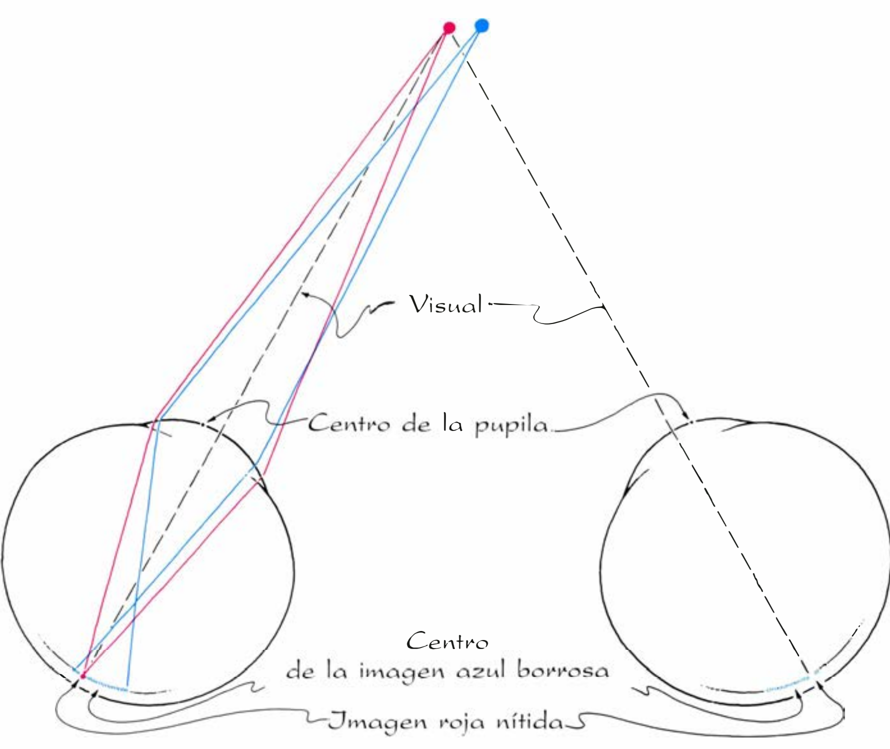
En 1965, B.N. Kishto, residente en la isla índica de Mauricio, describió en *Vision Research* algunos procedimientos para poner de manifiesto la dispersión cromática, iluminando sólo un lado de cada ojo. Para repetir una de sus experiencias, puede taparse la mitad contigua a la nariz del campo visual de cada ojo valiéndose de una tarjeta, a la vez que se mira los círculos de colores. Entonces, la luz que penetra en el ojo por el lado descubierto de la sien se refracta, y la componente azul se acerca a la normal más que la roja en la superficie de la córnea. Esa dispersión se acentúa por el cristalino. Así, la imagen azul va a parar al lado nasal de la roja y el círculo azul aparenta estar más lejos que el rojo.

Seguidamente, se bloquea la mitad contigua a la sien del campo visual de cada ojo. El azul seguirá refractándose más que el rojo, pero la nueva orientación de la normal cambia las posiciones relativas de las imágenes. En este caso, la imagen azul se encuentra en el lado de la sien de la imagen roja y, en consecuencia, el círculo azul aparenta estar más cerca que el rojo.

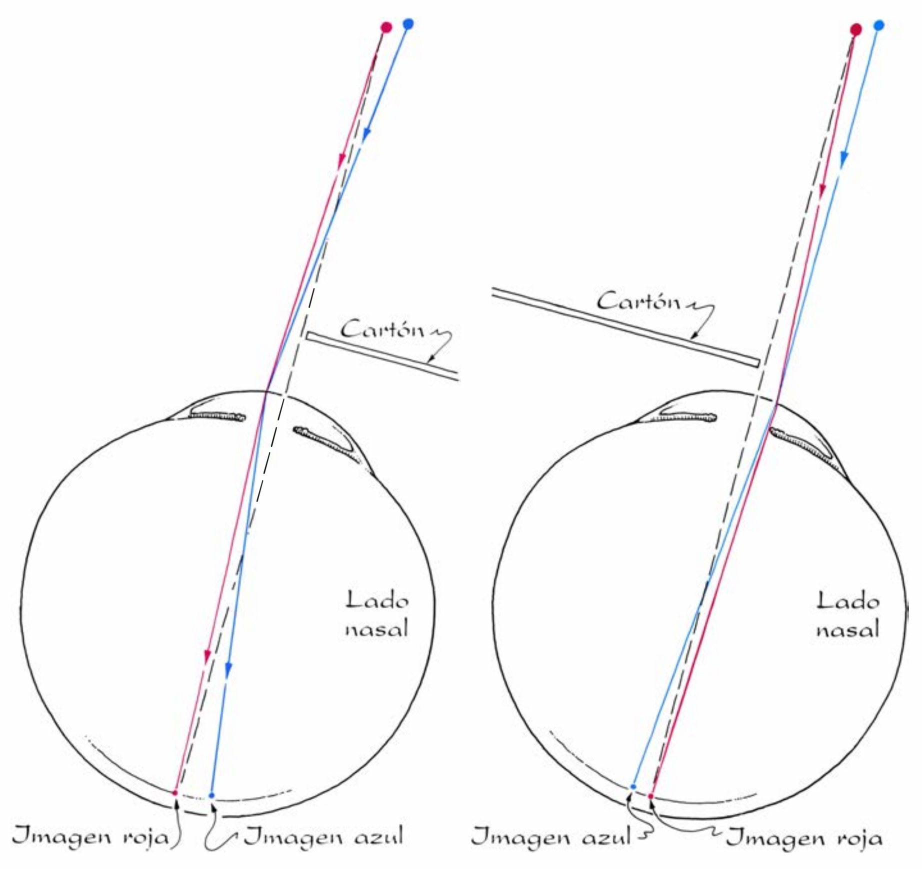
Con un estenope pueden conseguirse los mismos resultados. Para ello, se abre un orificio de unos dos milímetros de diámetro en un cartón delgado. Luego se mira al círculo coloreado con un ojo cerrado y el estenope delante del otro ojo. Si el estenope se coloca en el lado de la sien del ojo abierto, el círculo azul parece estar más lejos que el rojo. Esa profundidad aparente se invierte al llevar el estenope al lado de la nariz.

El estenope crea otra ilusión. Si se mira a través del mismo, a la vez que lo movemos hacia los lados nasal y de la sien del campo visual, tan lejos como sea posible sin perder de vista los círculos, se verá que la separación lateral (izquierda-derecha) entre los círculos cambia, siendo menor cuando el estenope está en la posición contigua a la nariz más extrema, y mayor cuando está en la posición extrema contigua a la sien. El aumento de la dispersión en el lado de la sien resulta de la alineación oblicua de la visual con la línea de simetría que atraviesa el cristalino del ojo.

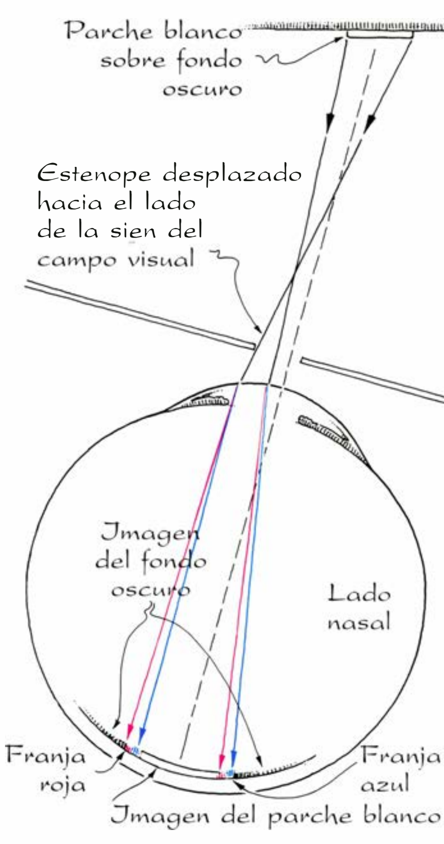
Kishto mostró, asimismo, de qué modo la dispersión de la luz podía producir franjas coloreadas sobre un parche blanco pequeño, con un entorno



6. *Formación de la ilusión de estereoscopía cromática*



7. *Experimentos con un cartón*




*8. Cómo producir franjas coloreadas*

oscuro, cuando se observa tal parche a través de un estenope. Para verficar ese fenómeno, puede pegarse un pequeño rectángulo blanco sobre una tarjeta negra. Al sostener entonces el estenope en el lado de la sien de un ojo, ese lado del parche blanco aparece con franjas azules y el lado de la nariz con franjas rojizas. Al desplazar el estenope hacia el lado nasal del ojo, los colores se invierten.

La luz blanca procedente del parche se dispersa en colores al penetrar en el ojo. En el centro de la retina, empero, el color proveniente de un punto del parche se solapa con colores procedentes de otros puntos, recreando una percepción de blanco. Por tanto, se ve color únicamente a lo largo de los bordes izquierdo y derecho del parche rectangular.

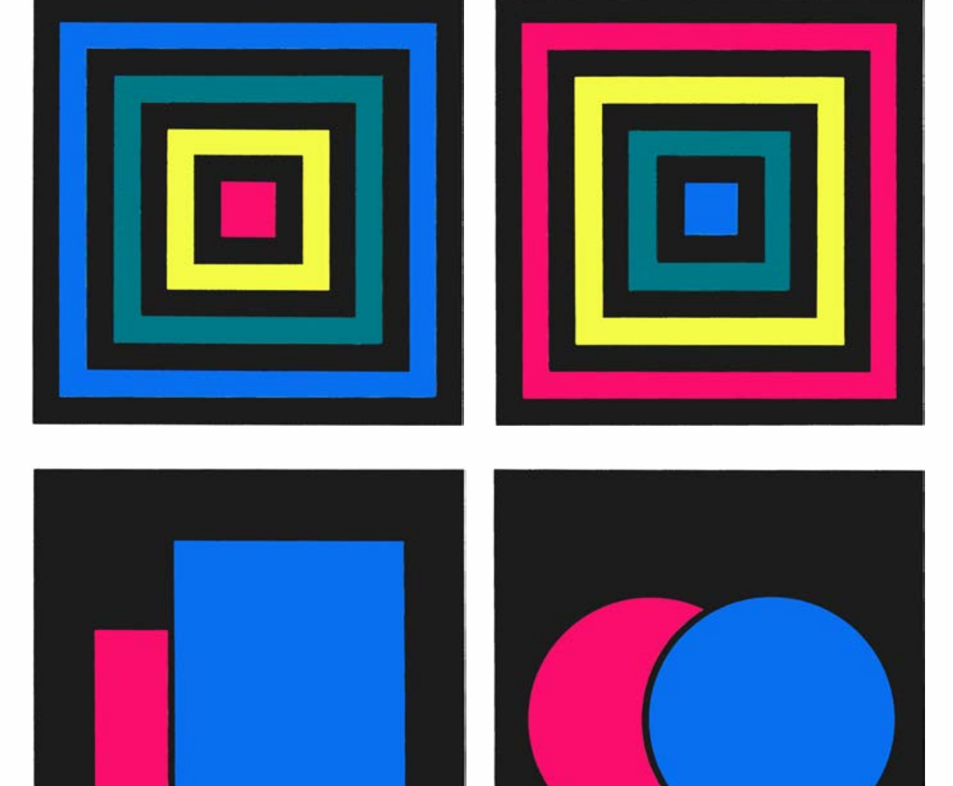
En otros experimentos descritos por Kishto, los observadores miraban parches coloreados equidistantes a través de prismas de vidrio estrechos, a fin de aumentar la dispersión de la luz. Con los vértices de los prismas apuntando hacia el lado de la sien de cada ojo, el observador debía disminuir la convergencia de sus ojos para ver los parches. En tal situación, un parche rojo parecía más cercano que otro azul. Ahora bien, la situación se invertía cuando los vértices se apuntaban hacia el lado nasal de cada ojo.

La ilusión de profundidad se manifestaba con mayor intensidad cuando los parches ocupaban alrededor de un grado en el campo visual y estaban separados entre un cuarto y medio grado. En algunos ensayos, el observador miraba una figura de cuatro parches de colores diferentes. Con determinadas combinaciones de colores, las esquinas internas de los parches parecían combarse hacia arriba o hacia abajo con relación al plano de las esquinas externas. La ilusión de profundidad es más débil en las esquinas externas más distantes. Joseph Hodych, de la Universidad Memorial de Terranova, ha sugerido codificar en colores mapas de los campos magnéticos, para contemplarlos luego a través de una gran lente de aumento, de tal modo que la intensidad relativa de los campos esté representada por la profundidad con que se perciban los colores. De hecho, se trata del primer dispositivo de dos prismas de Kishto.

En otro conjunto de experimentos, los observadores contemplaban figuras de franjas coloreadas y negras, concebidas para proporcionar indicios pictóricos acerca de la profundidad. En un caso, el orden de las zonas coloreadas, desde el cuadrado central hacia fuera, era rojo, amarillo, verde y azul. Observando esta figura con ambos ojos, mediante prismas con los vértices apuntando uno hacia otro, o con un ojo mirando por un estenope situado en el lado nasal del ojo, se veía algo parecido a un corredor. Al invertir el orden de los colores, la vista se convertía en algo parecido a un fuelle proyectado hacia el observador.

Si la figura carece de color, los indicios de profundidad son ambiguos. Puede verse cual si se tratara de un corredor o un saliente. Con la impresión de profundidad adicional que proporcionan los colores, el observador queda trabado en cualquiera de esas dos percepciones.

En otra figura [*véase la ilustración inferior de la figura 9*], el indicio pictórico de que un objeto bloquea la visión de otro objeto más alejado es tan fuerte que el fenómeno de estereoscopía cromática se muestra incapaz de alterar la percepción de profundidad. Resulta entretenido estudiar figuras en las que los indicios pictóricos acentúan o se oponen a la ilusión de profundidad creada por colores contiguos.



*9. Figuras ideadas para dar señales pictóricas*

# Libros

## *Sobre heurística, Copérnico ciencia y técnica y selección*

Miguel de Guzmán, José Chabás, Juan A. Paniagua y L. Alonso

Solución Ideal de Problemas, por J. D. Bransford y Barry S. Stein. Editorial Labor; Barcelona, 1986. Los intentos sistemáticos para tratar de mejorar los procesos mentales son cosa antigua en la historia del pensamiento. Es posible que se remonte a los pitagóricos del siglo VI a. de C. la recomendación explícita de una de las prácticas que, con seguridad, conducen a un comportamiento más sano de nuestra mente y de nuestro espíritu en general. Así se dice en los Versos Aureos, que resumen el ideal pitagórico de conducta: /40/ "No dejes que el sueño suave llegue a tus ojos /41/ antes de haber repasado en tu mente por tres veces cada una de tus acciones del día".

Son muchos los filósofos que han dedicado su esfuerzo a profundizar en la naturaleza y en el misterio de nuestro conocimiento. No tantos han sido los que han pensado en dar reglas concretas útiles para su uso más correcto. Con la llegada del Renacimiento se produce en algunos un apreciable desplazamiento de interés, desde el saber por el saber hacia el entender mejor para poder más. Francis Bacon analiza a fondo algunos de los que hoy llamaríamos bloqueos de la mente: *idola theatri* (bloqueos a causa de la tradición), *idola fori* (bloqueos causados por las ideas de moda), *idola specus* (los ídolos de la caverna, bloqueos por prejuicios personales), *idola tribus* (bloqueos por prejuicios colectivos). Y después instaura métodos de trabajo mental fundados en la experiencia y en la inducción.

Las *Regulae ad directionem ingenii* de Descartes, que nunca publicó en vida, constituyen el armazón, para uso propio, en forma de breves reglas, de lo que después vino a desarrollar en el *Discurso del método*. En las directrices de Descartes puede verse el germen de muchos de los consejos que hoy aparecen en las modernas obras de heurística, que es, ni más ni menos, el arte de producir *eurekas*. Es decir, la heurística trata de conducir la mente por los caminos más adecuados en su constante enfrentamiento con los problemas normales de la existencia cotidiana y también con los problemas más específicos que la ciencia y la tecnología le plantean. El objeto de la heurística es el conjunto de los procesos mentales ante

un problema de cualquier tipo y su finalidad consiste en proporcionar guías específicas para llegar a la mejor solución del mismo.

Así concebida, la heurística abarca, de modo natural, el estudio de la creatividad, de los bloqueos mentales, de los métodos específicos para la generación de ideas, de las técnicas concretas de resolución de problemas de tal o cual naturaleza. Puesto que la capacidad del hombre para la resolución de sus problemas no es, ni muchos menos, una característica puramente intelectual, sería incompleto restringirse al estudio de sus mecanismos lógicos. El hombre se enfrenta a un problema cualquiera desde toda su persona, no solamente desde su mecanismo raciocinante. Hay individuos extraordinariamente brillantes en muchos aspectos intelectuales que permanecen totalmente bloqueados ante un problema que explícitamente se les propone como "matemático".

La obra, esencialmente interdisciplinar, sobre la heurística así concebida, está aún por hacer. En los años cincuenta hubo un fuerte despertar del interés explícito por los mecanismos de la creatividad entre los psicólogos de Estados Unidos, a raíz de un famoso trabajo de Guilford sobre la inteligencia y la creatividad. Entre los matemáticos se habían producido ya en los cuarenta varios estudios que pronto se hicieron clásicos, uno de H. Poincaré (*L'invention mathématique*), otro de J. Hadamard (*The Psychology of Invention in the Mathematical Field*) y otro de G. Polya (*How to Solve It*). Enseguida tuvo lugar una explosión de interés por los métodos creativos individuales y colectivos tales como el *brainstorming* de A. Osborne (*Applied Imagination*, 1957), la sinéctica de W. Gordon (*Synectics*), más tarde el pensamiento lateral de E. De Bono (*Lateral Thinking*), etc. Uno de los estudios más difundidos sobre la creatividad fue el de A. Koestler (*The Act of Creation*).

Más adelante, el estudio del tema se ha ido especializando y fraccionando. Ha habido trabajos muy importantes sobre resolución de problemas en matemáticas, como los de Polya (*Mathematical Discovery, Mathematics and Plausible Reasoning, Mathematical Methods in Science*) que han creado toda una escuela de enseñanza de la matemática. Se han realizado estudios interesantes dedicados a los bloqueos, como el de A. Adams (*Conceptual Blockbusting*). En la actualidad, parece que el estudio de la creatividad vuelve a estar muy de moda en Estados Unidos. Una de las obras más influyentes para ello puede haber sido la del profesor de la Universidad de Chicago B. S. Bloom (*Developing Talent in Young People*, 1985) en la que se analiza, a través de entrevistas personales, el camino hacia el éxito de más de un centenar de jóvenes estadounidenses (de menos de 30 años) que han conseguido situarse en los primeros puestos en sus respectivas profesiones (arquitectos, matemáticos, nadadores, escultores, neurocirujanos...). La preocupación en Estados Unidos por el deterioro actual de la enseñanza en los primeros niveles y la pérdida del liderazgo en algunos aspectos de la tecnología han constituido, sin duda, un estímulo importante.

La pregunta natural que uno se hace justificadamente ante la heurística es si efectivamente sirve para algo. Nuestro viejo adagio, *quod natura non dat Salmantica non praestat*, nos hace pensar en tales métodos con la misma desconfianza con la que miramos el anuncio del crecepelos maravilloso o del adelgazante sin dieta ni ejercicio físico. Es verdad que, como afirma Polya, *a pensar sólo se aprende pensando*, de la misma forma que uno no llegará a aprender a esquiar mediante el sabio *Manual del Perfecto Esquiador*, sino tirándose por la ladera unas cuantas veces. Es claro que la mejor manera de aprender a resolver problemas consiste en tratar de resolver muchos y cada vez más difíciles. Pero también es cierto que, como en el esquí o en el piano, hay también en el arte de pensar bien una serie de actitudes mentales, un saber hacia dónde mirar, un percibir dónde y cómo colocarse, que resulta transmisible y que fácilmente diferencia a quien ha tenido una buena escuela del que no la ha tenido nunca. Tales actitudes se captan, se asimilan y se transmiten sin gran esfuerzo consciente cuando el maestro y el aprendiz juntos, como en el taller medieval, se ponen a la vez delante del mismo problema y el maestro, pensando en alto, va desplegando una tras otra las astucias seculares llegadas a él y las que él mismo ha sido capaz de fraguar. La principal misión de la heurística no es compartir trucos ni soluciones, sino transmitir las actitudes profundas que han conducido a ellas. Cada una de sus máximas, reglas o direcciones, no se debe mirar como una instrucción más del manual de utilización de la inteligencia, sino como una mera indicación de una actitud que puede favorecer efectivamente que salte la chispa, el eureka del problema que nos ocupa.

Entendida en este sentido la heurística, que pretende poner a nuestro alcance, en el grado que esto es posible, las formas diversas de señorío de los problemas por los grandes maestros del pensar bien, puede resultar muy útil a la mayor parte de las personas, aunque muy probablemente resultará superflua y aburrida a los pocos genios que en el mundo son y han sido.

La obra que nos ocupa, de título *La solución* IDEAL *de problemas*, y subtítulo *Guía para mejor pensar, aprender y crear*, tiene un contenido que se adapta mejor a su subtítulo que al título. En conjunto, constituye, en efecto, una agradable introducción a una panoplia de métodos para mejorar los procesos mentales. El calificativo IDEAL del título contiene en realidad una especie de mera regla mnemotécnica para identificar el modelo heurístico que se propone: I=Identificación del problema; D=Definición del problema; E=Exploración de análisis alternativos; A=Actuación conforme a un plan; L=Logros alcanzados.

En el capítulo 1, *Importancia de la heurística*, se ponen de relieve los beneficios que una ocupación seria con los procesos de resolución de problemas puede aportar. El capítulo 2, *Un modelo para mejorar la capacidad heurística*, desarrolla las características del método IDEAL. A mi parecer, los autores se apresuran un tanto en su paso por esta sección de la obra, que hubiera podido constituir ella sola, desarrollada con paz, el núcleo fundamental único de toda la obra. Como método de tratamiento de problemas echo de menos una exposición más detenida de la actitud inicial adecuada, de los bloqueos de todo tipo, afectivos, sociales, culturales, conceptuales... que nos impiden a menudo atacar los problemas con efectividad. Las etapas de incubación e iluminación en la resolución del problema apenas vienen sugeridas en este lugar, y muy sucintamente en el resto de la obra. Por otra parte, lo que a mi parecer constituye la fase más importante para mejorar la capacidad para resolver problemas, en la que tanto insistieron los pitagóricos, así como Descartes en sus *Reglas* y Polya, que es la autocrítica sobre el propio proceso de enfrentamiento con el problema, una vez que ha concluido, merecía un tratamiento más extenso.

En el resto del libro, capítulos 3 al 8, cada uno de una serie de procesos mentales son considerados como problema objeto al que se aplica el método IDEAL. En el 3, *Mejorar la memoria*, se proponen unas cuantas técnicas de re-

cordación para que cada uno examine la que le va mejor. En el 4, *Aprender y comprender*, los procesos de aprendizaje y comprensión se miran bajo la óptica del método IDEAL. En el 5, *Crítica inteligente*, se pretende estimular el análisis de afirmaciones sobre hechos, el de razonamientos y el de presuposiciones de la argumentación. El capítulo 6, *De la crítica a la creatividad*, contiene breves anotaciones sobre presunciones explícitas o tácitas que vienen a imposibilitar o dificultar la actividad creativa, así como una descripción de algunas de las técnicas para generación de ideas, como el *brainstorming* (torbellino de ideas). El capítulo 7, *Comunicación efectiva*, considera como problema el hacer llegar a otras personas un mensaje. El capítulo 8, *Observaciones finales*, es un brevísimo epílogo recapitulativo sobre el método IDEAL.

Cada capítulo contiene una pequeña colección de ejercicios resueltos al final del libro para poner en práctica las directrices del capítulo. Asimismo, contiene una colección de notas, muy frecuentemente bibliográficas, y una serie de lecturas recomendadas, probablemente de difícil acceso unas y otras para el lector español no especializado. La traducción, a cargo de Luis Bou, es excelente. El libro se lee de modo suave y agradable. Su presentación externa es muy satisfactoria.

A pesar de algunas de las limitaciones señaladas de la obra, el tema de la heurística es tan interesante e importante, y la escasez de literatura en castellano sobre él es tal, que el libro se leerá, sin duda, con agrado, interés y provecho entre nosotros y tendrá la virtud de despertar el apetito de más obras en esta dirección. (M.G.)

MATHEMATICAL ASTRONOMY IN COPERNICUS'S DE REVOLUTIONIBUS, por N. M. Swerdlow y O. Neugebauer. Springer-Verlag, 1984. No es una tarea sencilla realizar un análisis sistemático del contenido científico de alguna de las obras fundamentales de la historia de la ciencia. Ese tipo de estudios es muy poco frecuente; abundan más las traducciones, las ediciones críticas y sobre todo los comentarios parciales de las obras científicas que han llegado hasta nosotros. Escasean los trabajos que contienen, además, una reconstrucción matemática sobre tal o cual obra científica.

En el campo de la historia de la astronomía, el panorama no es muy distinto; contamos, sin embargo, con algunos excelentes trabajos de esas características y, entre ellos, destaca la minuciosa exposición que hizo Olaf Pedersen de la astronomía matemática contenida en el *Almagesto* de Ptolomeo (*A Survey of the Almagest*, Odense, 1974).

Recientemente ha aparecido otro estudio de ese género: un análisis profundo, desde un punto de vista técnico, y no filosófico o sociológico, de la astronomía matemática contenida en la obra cumbre de Nicolás Copérnico, publicada en 1543, *De revolutionibus*. Los autores, Swerdlow y Neugebauer, centran su estudio casi exclusivamente en los aspectos matemáticos, "con la idea, tal vez ingenua, de que cuando Copérnico escribía que las matemáticas se escriben para los matemáticos, estaba convencido de ello, y de que su trabajo sólo puede entenderse plenamente en el marco de la historia de la astronomía matemática" (p. 94). Al hacerlo así, renuncian conscientemente a analizar la forma de ver el cielo y, en general, el cosmos, propia de Copérnico, aspecto éste sobre el que existe una abundante literatura.

Noel M. Swerdlow procede del campo de la astronomía y ha orientado su actividad científica hacia la historia de la astronomía clásica, trabajo que realiza en el departamento de astronomía y astrofísica de la Universidad de Chicago, junto a algunos de los científicos que más han contribuido a la investigación en astrofísica. Entre ellos destaca, por ejemplo, Subrahmanyan Chandrasekhar, premio Nobel de física en 1984, a quienes los autores dedican esta obra. En el prólogo, Swerdlow agradece a los miembros de su facultad la ayuda y el estímulo recibidos y, sobre todo, "el hecho de haber mantenido firmemente el principio de que los estudios históricos son una parte natural de la investigación científica". Es un dato a retener, que contrasta con un tipo de opiniones de menosprecio hacia la historia de la ciencia lamentablemente todavía presentes en ciertos sectores de nuestra comunidad científica.

El otro autor es Otto Neugebauer, posiblemente el decano de los historiadores de la ciencia, y del que, no hace mucho, George Saliba ha dicho con gran acierto que "resulta difícil imaginar la existencia de un historiador de la ciencia que no haya utilizado las obras de O. Neugebauer en algún u otro momento. Pero es aún más difícil, tal vez imposible, encontrar un historiador de la astronomía que no haya estudiado esos trabajos con gran diligencia".

La obra *Mathematical Astronomy in Copernicus's De revolutionibus* forma parte de la prestigiosa colección de Springer-Verlag, "Studies in the History of Mathematics and Physical Sciences", dirigida por G. J. Toomer y que se inicia precisamente con la obra más ambiciosa de Neugebauer, *A History of Ancient Mathematical Astronomy*, aparecida en 1975.

Los autores han dividido su trabajo en dos partes, cada una de ellas contenida en un volumen independiente. La primera parte, de más de 500 páginas, se estructura en seis capítulos. El primero es una introducción general en la que, tras unos comentarios sobre la vida de Copérnico, se sitúa la astronomía del *De revolutionibus* en la tradición básicamente ptolemaica, traída hasta el siglo XV por Regiomontanus, y se analizan las influencias que aquélla recibió de diversos astrónomos medievales, especialmente musulmanes. Para Copérnico, la obra de Ptolomeo fue una guía constante, al tener "la convicción de que las descripciones de los fenómenos hechas por Ptolomeo son correctas y los modelos que las representan son, por lo menos, teóricamente precisos" (p. 36). Así, Copérnico aparece más ptolemaico que "copernicano", en la línea de la valoración que ya hiciera un gran copernicano, Johannes Kepler: "Copérnico, ignorante de sus propias riquezas, se dedicó principalmente a representar a Ptolomeo, y no a la naturaleza, a la que sin embargo se había acercado como nadie".

El segundo capítulo se dedica al análisis de la trigonometría y la astronomía esférica del *De revolutionibus*, temas en los que Copérnico no hizo ninguna contribución original, pero que utilizó con maestría para dar sustentación a toda su teoría planetaria. El problema de los movimientos de la Tierra es abordado en el capítulo 3; se trata aquí de la construcción de una teoría heliocéntrica que diese cuenta con exactitud de los problemas de la precesión del punto aries, la no uniformidad de ésta, la variación de la excentricidad y el movimiento no uniforme de la línea de los ápsides, así como de toda la problemática de la ecuación del tiempo.

La teoría lunar ocupa, cómo no, el capítulo 4 (se corresponde con el Libro IV del *De revolutionibus* y, por cierto, con el Libro IV del *Almagesto*, y con muchos otros capítulos 4 de obras medievales de astronomía, tan frecuentemente referidos a la Luna). El modelo lunar de Copérnico ya está contenido en su *Commentariolus* (posiblemente esta parte estuviese ya escrita en 1510) y pretende dar respuesta a las objeciones que venían haciéndose al mo-

delo lunar ptolemaico, tanto por no preservar la uniformidad del movimiento circular como por producir variaciones de la distancia Tierra-Luna no compatibles con la observación. El modelo de Copérnico supera estas dificultades y es análogo al que propuso unos dos siglos antes el astrónomo de Damasco Ibn ash-Shāṭir.

El capítulo 5, de casi 200 páginas, se centra en los movimientos de los planetas (derivación de los elementos de sus órbitas, construcción de los modelos de movimiento, cálculos a partir de éstos y confrontación con las observaciones disponibles). Toda la teoría está elaborada, en cada caso, en longitud. Comentario aparte merecen los movimientos planetarios en latitud, que Copérnico basa casi totalmente en observaciones contenidas en el *Almagesto* y otras obras de Ptolomeo, y cuya única finalidad parece ser la de dar una explicación satisfactoria de éstos.

La segunda parte de *Mathematical Astronomy in Copernicus's De revolutionibus* está contenida en un volumen separado, de unas 200 páginas, que incluye todos los elementos accesorios que acompañan al texto propiamente dicho: listas de notaciones y símbolos, parámetros numéricos, tablas explicativas, figuras –en número superior a 200–, bibliografía e índice temático. El hecho de estar editada en un volumen independiente resulta un acierto, pues la lectura se ve así facilitada. Por otra parte, hay que señalar que el texto no arrastra un pesado aparato de notas, como es frecuente en otras obras; antes al contrario, las notas a pie de página han sufrido una dura selección.

Al tratarse de una obra de análisis y reconstrucción matemática que sigue paso a paso el esquema del *De revolutionibus* y al no ir acompañada de la traducción de éste, resulta imprescindible disponer de un ejemplar de la obra de Copérnico. Swerdlow y Neugebauer sugieren la conveniencia de disponer de una copia facsímil de la edición impresa en Neuremberg, en 1543. En castellano, puede utilizarse la edición hecha por C. Mínguez y M. Testal para Editora Nacional: *Sobre las revoluciones (de los orbes celestes)*, Madrid, 1982.

Estamos ante un libro más de estudio que de simple lectura; a medida que nos adentramos en él, crece (por lo menos a este lector así le ha ocurrido) la admiración por la seriedad, el rigor y la profundidad del trabajo de reconstrucción realizado por Swerdlow y Neugebauer sobre una de esas obras científicas de las que se dice que han conmovido al mundo. Tanto los resultados que se desprenden de su análisis como la propia metodología de éste proporcionan una lección continua. Trabajos como éste infunden un gran respeto, pero enseñan y, por tanto, ayudan a avanzar. (J.Ch.).

CIENCIA, TÉCNICA Y MEDICINA, por Pedro Laín Entralgo. Alianza Editorial; Madrid, 1986. En un artículo reciente, el sucesor de Pedro Laín en su cátedra, Diego Gracia, evoca aquel dicho evangélico: "Recoged los fragmentos para que no se pierdan"; y pienso que tal expresión puede ser punto de partida de esta reseña. Todo autor importante tiene, junto a los libros que cualquier persona culta conoce, junto a los trabajos publicados en revistas de su especialidad, un buen número de producciones que se perdieron en el aire de su expresión oral o en las páginas de un impreso anodino. Son fragmentos dispersos que conviene recoger para que no caigan en el olvido. Pero también hay que procurar que lo recogido sea realmente valioso, y que se seleccione de tal modo que no constituya un conglomerado sino una estructura orgánica: variada y homogénea a la vez. Creo que ambas condiciones se dan cumplidamente en el libro que nos ocupa: que lo que contiene es bueno y es coherente.

En las primeras líneas del prólogo, dice su autor: "Bajo la diversidad temática de los textos aquí resumidos, no será difícil percibir el pensamiento que los unifica y articula: una idea de la ciencia, la técnica y la medicina, sistemáticamente conexas entre sí". Esto es lo que justifica –lo que hace imprescindible– la noticia de esta obra en una revista como *Investigación y Ciencia*, cuya razón de ser se encuentra en la misma línea. Y es que la historia de la medicina y de la ciencia que, desde hace tantos años, está enseñando Laín, no es una sucesión de datos muertos, sino una lúcida recreación de lo que hay de vivo en el pasado, que resulta clarificador del saber presente e incitadora del progreso futuro. Como sigue diciendo el prólogo: "el conocimiento científico del mundo adquiere pleno sentido y entera vigencia desde dos actitudes mentales divergentes entre sí, pero entre sí complementarias"; ya que la ciencia es "intelección racional de la verdad", a la vez que "recurso supremo para el manejo racional de las cosas que existen y para la metódica fabricación de las que no existen"; es decir: "fundamento intelectual de la técnica". Desde cualquiera de estas actitudes científicas –la del puro investigador y la del práctico–, pueden ser leídas con fruto las páginas de este libro; o, al menos, aquellas cuyo contenido resulte más afín a los intereses propios.

Hay, en la amplia gama temática de esta agrupación de trabajos, una zona que interesa preferentemente al médico clínico; pues lo que en ella se dice ilumina diversos aspectos de su quehacer cotidiano. Así, los titulados: "Amor al hombre y amor al arte...", "Mentalidad internística y mentalidad quirúrgica", "Qué es ser un buen enfermo", "La palabra y el silencio en el médico", etc. Algo tan vivo e inquietante como es la situación y las perspectivas de la medicina contemporánea lo encontramos cumplidamente analizado en el largo y hondo texto: "Subjetualidad, subjetividad y enfermedad" y en las breves y expresivas páginas de: "Estructura de la medicina actual".

Pero buena parte del contenido de este volumen ha de interesar a cualquier científico, porque las cuestiones abordadas llegan a la raíz misma del simbólico "árbol de la ciencia", porque descubre los fundamentos de la investigación científico-natural. En el primero de los ensayos de esta serie –"El saber científico y su historia"–, se analiza lo que es permanente y lo que es coyuntural en cada uno de los momentos del proceso investigador: el intuitivo, el conceptivo, el constructivo, el interpretativo y el posesivo. Un tema muy caro al profesor Laín Entralgo es el que aquí se expresa en el ensayo: "Ciencia helénica y ciencia moderna"; ahí está esa original e irrepetible hazaña iniciada por los "fisiólogos" presocráticos y consumada por Aristóteles, de alcanzar la noción de una naturaleza varia y una, fecunda y ordenada, que podía ser comprendida por la razón –la aplicación del *logos* a la *physis*– y, por ello, ser técnicamente encauzada; pero también esa asimilación de la ciencia y la técnica helénicas hecha por los pensadores de la cristiandad medieval con unos recursos conceptuales tan vigorosos que –a partir del voluntarismo del siglo XIV–, llevarían al hombre a no conformarse con ser mero imitador de la naturaleza sino su dominador: "cuasi-creador" dirá Zubiri, al lograr cosas que superan las naturales. De ahí parte ese progreso técnico que envuelve, facilita y también abruma la vida actual; a él apunta aquí especialmente el ensayo "Respuesta a la técnica".

En otros artículos, expone el autor su idea de lo que hay de irreductible en la naturaleza del hombre: concepto forjado en el ámbito helénico y enriquecido con su personalización en el mundo cristiano, que sufre el doble ataque del evolucionismo y del historicismo; describe los diversos talantes –el "sacerdotal" y el "deportivo" especialmente– de los hombres que cultivan la ciencia de modo eminente; y habla en concreto del ser y del quehacer de algunos de ellos. De entre los estudios referidos a personalidades concretas, destacaría la apasionada contemplación de la figura de Einstein en su triple aspecto de "sabio especialista, sabio filósofo, sabio integralmente humano"; y el penetrante análisis de lo que para Cajal fue el saber científico; y la exposición –sencilla y convincente– de las sucesivas orientaciones del empeño investigador de Pasteur.

Un muestrario bien diverso. Pero no un cajón de sastre. Además del hilo conductor de esta colección de ensayos, al que antes aludíamos, se advierte la unidad que da al conjunto la claridad del pensamiento, del método expositivo y de la prosa de Laín. Cada lector, al abrir el libro, elegirá el artículo que mejor le vaya. Pero es seguro que de éste pasará a otros y a otros más, aunque inicialmente le hubieran parecido ajenos a su curiosidad. (J.A.P.)

THE NATURE OF SELECTION. EVOLUTIONARY THEORY IN PHILOSOPHICAL FOCUS, por Elliott Sober. The MIT Press, Cambridge, 1984. Se cumplen ahora cincuenta años de la aparición de *Genetics and the Origin of Species*, de Theodosius Dobzhansky, punto de arranque oficial de la teoría neodarwinista de la evolución. Parafraseando aquel apotegma suyo "nada en la biología moderna tiene sentido a extramuros de la evolución", podríamos afirmar que nada tiene sentido en la evolución fuera de la selección natural. Para un neodarwinista, por supuesto.

Sober, profesor de filosofía en la Universidad de Wisconsin en Madison, aborda la naturaleza y el significado de tres nociones fundamentales en la teoría biológica: selección, eficacia biológica ("fitness") y adaptación. En torno a esas tres cuestiones básicas teje una doctrina que pretende cubrir los campos principales del dominio de la filosofía de la biología: causa, azar, reduccionismo, determinismo, etcétera. Aunque muestra un buen conocimiento de las nociones biológicas que maneja, depende demasiado estrechamente de Richard Lewontin en genética cuantitativa (en realidad, en todo), de S. J. Gould en paleontología y de E. Mayr en historia de la biología. Por decirlo geográficamente, Sober no ha salido de Harvard.

¿Qué incidencia tiene ello? En primer lugar, el abuso de situaciones hipotéticas, el uso constante de los dados en detrimento de un estudio directo de las situaciones reales, de casos planteados por el quehacer diario de la investigación biológica; la máxima concesión que hace es la repetición de ejemplos sacados de los manuales (anemia falciforme para explicar la heterocigosis). En segundo lugar, la omisión de aspectos vivos e ineludibles: la selección nucleotídica, el polimorfismo enzimático y, en el extremo opuesto, la competencia entre individuos y grupos. Una cuestión tan cara a Lewontin –digamos a Sober– como la selección dependiente de la frecuencia hubiera ganado verosimilitud con recordar los trabajos realizados sobre la selección del locus de la amilasa de *Drosophila melanogaster*, o de cualquier otra proteína. En tercer lugar, el sesgo de partida le impide exponer con suficiente hondura la tesis contrapuesta de Motoo Kimura sobre la deriva genética y su valor contrarrestante de la selección a ultranza propugnada por los neodarwinistas.

Desde el punto de vista filosófico, cree el autor que la teoría de la evolución podría asimilarse a la teoría newtoniana de fuerzas cuyo estado de equilibrio estacionario vendría dado por la ley de Hardy-Weinberg. (Dicha ley afirma que, en una población panmíctica –de apareamiento libre y al azar–, un locus con dos alelos *A* y *a*, éstos se mantienen estables; es decir, los tres genotipos *AA, Aa* y *aa* permanecen constantes generación tras generación.) Situación que cambiará en cuanto intervengan otras fuerzas: selección, mutación, migración, etcétera. Pero ocurre que los organismos no son sistemas cerrados, sino abiertos y disipativos de energía que se acomodan mejor a la termodinámica de los procesos irreversibles, donde la información desempeña un papel crucial. La selección, la eficacia biológica y la adaptación encuentran mejor acomodo en un proceso de acopio de información y elaboración de la misma, que en una descripción de la selección como única "fuerza conductora".

Esto último nos lleva al carácter propio de la biología. ¿Es o no distinta de la física y la química? La biología se encuentra hoy ante la siguiente paradoja: por un lado, se niega el mecanicismo, según el cual las entidades vivas serían entidades meramente físicas o químicas; por otro, se rechaza el vitalismo, de acuerdo con el cual habría, además de los componentes físicos y químicos, entidades inmateriales llamadas entelequias, impulso vital, energía radial y otros por el estilo. Para resolver la aporía, empezó a cobrar curso legal la palabra "emergente": las propiedades biológicas serían emergentes, ni físicas o químicas sólo, ni inmateriales. Sober se mueve en esa onda y habla de propiedades que se "sobreañaden" (*supervene*). De esta guisa sería la eficacia biológica: un sobreañadido a las propiedades físicas del individuo ante un medio dado. Pero eso no dice en qué consiste la añadidura. ¿Por qué no pensar en la información, en forma de memoria o en cualquier otra manifestación de la misma?

Distingue entre selección para una propiedad (*selection for*) y selección de un organismo (*selection of*); ésta pertenecería a los efectos de un proceso de selección, en tanto que aquélla pertenecería a las causas. Afirmar que existe selección para una propiedad determinada, escribe, significa que tener tal propiedad *es causa* de éxito en la supervivencia y en la reproducción. Pero decir que un objeto ha sido seleccionado no es más que afirmar que el resultado del proceso selectivo consistió en aumentar la representación de ese tipo de objeto (p.100). Aunque el autor protesta que no existe una propiedad separada de un sujeto, resulta difícil ver en ello más allá de un proceso clásico de convergencia de caracteres. En todo caso, si no queremos introducir una fuerza teleológica, una causa final para hablar claro, tendremos que apelar, de nuevo, a la información retenida.

El libro de Sober plantea muchísimas cuestiones. De la actualidad de las mismas nos habla la bibliografía aparecida con posterioridad, de la que entresacaré dos obras: *Evolution through Group Selection*, de V. C. Wynne Edwards, cuya primera edición –con título distinto– sistematizaba la teoría de la selección grupal y en relación con la cual Sober aborda ese campo de la selección, y *Natural Selection in the Wild*, de John A. Endler. Aunque tras su lectura uno se siga preguntando en qué consiste la selección, la eficacia biológica y la adaptación, lo cierto es que llevará andado largo trecho hacia su respuesta. (L.A.)

# Bibliografía

*Los lectores interesados en una mayor profundización de los temas expuestos pueden consultar los trabajos siguientes:*

## PREVENCION DEL RECHAZO DE TRASPLANTES


Role of MHC Gene Products in Immune Regulation. B. Benacerraf en *Science*, vol. 212, págs. 1229-1238; 12 de junio de 1981.

Studies in Histocompatibility. G.D. Snell en *Science*, volumen 213, páginas 172-178; 1981.

The Major Histocompatibility Complex in Man. J. Dausset en *Science*, vol. 213, págs. 1469-1474; 1981.

Structure of Class I Major Histocompatibility Antigens. E. S. Kimball y J. E. Coligan en *Comp. Topics Molec. Immnul.*, vol. 9, págs. 1-63; 1983.

The Class II Molecules of the Human and Murine Major Histocompatibility Complex. J. F. Kaufman, C. Auffray, A. J. Korman, D. A. Shackelford y J. L. Strominger en *Cell*, vol. 36, págs. 1-13; 1984.

Structural Analysis of the Functional Sites of Class I HLA Antigens. J. A. López de Castro, J. A. Barbosa, M. S. Krangel, P. A. Biro y J. L. Strominger en *Immunological Reviews*, vol. 85, págs. 149-168; 1985.


## PREPARANDO EL ENCUENTRO DEL *VOYAGER 2* CON URANO


Voyager Flight Engineering: Preparing for Uranus. W. I. McLaughlin y D. M. Wolff. American Institute of Aeronautics and Astronautics Publication n.° 80-0287; 1985.

Mission Systems. Número especial del *Journal of the British Interplanetary Society*, vol. 38, n.° 10; octubre, 1985.

Voyager 2 Mission to uranus. Número especial de *Science*, vol. 233, n.° 4759; 4 de julio de 1986.


## GEOLOGIA POR INTERFEROMETRIA DE MUY LARGA BASE


The Earth's Variable Rotation: Geophysical Causes and Consequences. Kurt Lambeck. Cambridge University Press, 1980.

Very-Long-Baseline Radio Interferometry: The MARKK III System for Geodesy, Astrometry, and Aperture Synthesis. Alan E. E. Rogers et al. en *Science*, vol. 219, n.° 4580, págs. 51-54; 1983.

Variations in the Rotations of the Earth. W. E. Carter et al. en *Science*, vol. 224, n.° 4652, págs. 957-961; 1 de junio de 1984.

Geodetic Radio Interferometric Surveying: Applications and Results. W. E. Carter, D. S. Robertson y J. R. MacKay en *Journal of Geophysical Research*, vol. 90, n.° B6, páginas 4577-4587; 10 de mayo de 1985.


## FUNCION ENZIMATICA DEL ARN


Self-splicing RNA: Autoexcision and Autocyclization of the Ribosomal RNA Intervening Sequence of *Tetrahymena*. Kelly Kruger, Paula J. Grabowski, Arthur J. Zaug, Julie Sands, Daniel ED Gottschling y Thomas R. Cech en *Cell*, vol. 31, n.° 1, págs. 147-157; 1982.

The RNA Moiety of Ribonuclease P Is the Catalytic Subunit of the Enzyme. Cecilia Guerrier-Takada, Kathleen Gardiner, Terry Marsh, Norman Pace y Sidney Altman en *Cell*, vol. 35, n.° 3, parte 2.ª, páginas 849-857; diciembre 1983.

Biological Catalysis by RNA. T. R. Cech y B. L. Bass en *Annual Review of Biochemistry*, volumen 55, páginas 599-629; 1986.

The Intervening Sequence RNA of *Tetrahymena Is an Enzyme*. Arthur J. Zaug y Thomas R. Cech en *Science*, vol. 231, n.° 4737, págs. 470-475; 31 de enero de 1986.


## EL BOSON DE HIGGS


Teorías Gauge de las Fuerzas entre Partículas Elementales. Gerard't Hooft en *Investigación y Ciencia*, n.° 47, págs. 58-77; agosto, 1980.

Constructing Quarks: A Sociological History of Particle Physics. Andrew Pickering. University of Chicago Press, 1984.

The Second Creation: Makers of the Revolution in twentieth Century Physics. Robert P. Crease y Charles C. Mann. Macmillan Publishing Company, 1985.


## PECES ANTARTICOS


Biological Antifreeze Agents in Coldwater Fishes. Arthur L. DeVries en *Comparative Biochemistry and Physiology*, vol. 73A, n.° 4, págs. 627-640; 1982.

The Evolution of Neutrally Buoyant Antarctic Fishes: Their Specializations and Potential Interactions in the Antarctic Marine Food Web. J. T. Eastman en *Antarctic Nutrient Cycles and Food Webs* (*Proceedings of the Fourth SCAR Symposium on Antarctic Biology*), dirigido por R. W. Siegfried, P. R. Condy y R. M. Laws. Springer-Verlag, 1985.


## CARACTERISTICAS Y OBJETOS DEL PROCESAMIENTO VISUAL


La Percepción. Irvin Rock. Colección "Biblioteca Scientific American", Prensa Científica; Barcelona, 1985.

Properties, Parts and Objects. A Treisman en *Handbook of Perception and Performance*: *vol. 2*, dirigido por K. Boff, L. Kaufman y J. Thomas. John Wiley & Sons, Inc., 1986.


## GALILEO Y EL FANTASMA DE BRUNO


The Ash Wednesday Supper (La Cena de le Ceneri). Dirigido y traducido por E. A. Gosselin y L. S. Lerner. Archon Books, 1977.

Galileo. Stillman Drake. Alianza; Madrid, 1982.


## JUEGOS DE ORDENADOR


Star Fleet Technical Manual. Diseñado por Franz Joseph. Ballantine Books, 1975.

Microcomputer Displays, Graphics, and Animation. Bruce A. Artwick. Prentice-Hall, Inc., 1985.


## TALLER Y LABORATORIO


The Effect of Pupil Size Variations on the Colours Stereoscopic Phenomenon. Jon Martin Sundet en *Vision Research*, volumen 12, páginas 1027-1032; mayo, 1972.

Brewster and Wheatstone on Vision. Dirigido por Nicholas J. Wade. Academic Press, 1983.